



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Nils Holger Sova

**PROJEKTEERIMISPROTSESSI EFEKTIIVSUSE
TÕSTMINE PARAMEETRILISE MODELLEERIMISE ABIL**

INCREASING THE EFFECTIVENESS OF THE DESIGN
PROCESS WITH PARAMETRIC DESIGN

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Kadri Leiten, MSc

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		lühikokkuvõte	
Autor: Nils Holger Sova		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Projekteerimisprotsessi efektiivsuse tõstmine parameetrilise modelleerimise abil			
Lehekülgi: 81	Jooniseid: 50	Tabeleid: 2	Lisasid: 1
<p>Osakond / Õppetool:</p> <p>Metsandus- ja maaehitusinstituut / Maaehituse ja veemajanduse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:</p> <p>Tsiviilehitus, Hüdrotehnoloogia, Avameretehnoloogia, Pinnasemehaanika (T220)</p> <p>Juhendaja(d): Kadri Leiten</p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2021</p>			
<p>Uute tarkvaralahenduste kasutusele võtmist piirab projekteerimisettevõtete väike investeerimismaht ning peamiseks kuluallikaks on töötajate väljaõpe. Lihtsasti kasutatavate tarkvarade valimine võiks aidata innovaatilisi lahendusi kasutusele võtta.</p> <p>Lõputöö eesmärgiks on uurida valitud tarkvarade võimalusi projekteerimisprotsessi efektiivsuse tõstmisel ning analüüsida nende kasutusele võtmiseks kuluvat aega.</p> <p>Teoreetilise taustana antakse ülevaade ehitusvaldkonna infotehnoloogilisest arengust ning uude suuna võimalustest. Praktilises osas analüüsitakse valitud tarkvara abil mudelite loomisele ning sellele eelnenud väljaõppele kuluvat aega võrreldes käsitsiarvutusega.</p> <p>Suhteliselt lühikese väljaõppeajaga suudeti tarkvarasid efektiivselt kasutada parameetrilise geomeetria loomiseks ning selle ühendamiseks nii modelleerimistarkvara kui arvutustarkvaraga. Käsitletud tarkvaradel on kõrge potentsiaal efektiivsuse tõstmisel.</p>			
<p>Märksõnad: algoritmide kasutamine, projekteerimine, visuaalne programmeerimine, Grasshopper, Karamba3D</p>			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Professional Higher Education Thesis	
Author: Nils Holger Sova		Curriculum: Rural Engineering	
Title: Increasing the effectiveness of the design process with parametric design			
Pages: 81	Figures: 50	Tables: 2	Appendixes: 1
<p>Department / Chair:</p> <p>Institute of Forestry and Rural engineering / Chair of Rural Building and Water Management</p> <p>Field of research and (CERC S) code:</p> <p>Civil engineering, hydraulic engineering, offshore technology, soil mechanics (T220)</p> <p>Supervisors: Lecturer Kadri Leiten</p> <p>Place and date: Tartu, 2021</p>			
<p>Uptake of emerging software solutions is bottlenecked by construction consulting firms' lack of investment capital with the main source of expenditure being staff training. Choosing easy-to-use software could help improve the uptake of innovative solutions.</p> <p>The purpose of the thesis is to explore the possibilities of selected software in increasing the effectiveness of the design process and analyze time spent in training to use them.</p> <p>The theoretical background gives the infotechnological development of the construction sector and the possibilities of an innovative field of research. The practical part focuses on analyzing the time it takes to create the parametric models as well as time spent training to use them in comparison with a manual calculation method.</p> <p>Relatively little training was necessary to use visual programming software effectively and connect it to a design software or a calculation software. The addressed solutions have great potential in increasing the effectiveness of the design process.</p>			
Keywords: using algorithms, design, visual programming, Grasshopper, Karamba3D			

SISUKORD

TERMINID JA AKRONÜÜMID	6
SISSEJUHATUS	8
1. EHITUSVALDKONNA INFOTEHNOLOOGILINE ARENG	10
1.1. Ehitussektori tootlikkuse taust	10
1.1.1. Ehitussektori madal tootlikkus	10
1.1.2. Tootlikkuse tõstmine BIMi abil	13
1.1.3. Projekteerimisvaldkonna ettevõtete võimalused	14
1.2. Parameetiline modelleerimine	18
1.2.1. Sissejuhatus, mõisted	18
1.2.2. Taust	19
1.2.3. Parameetriliste seoste võimalused	20
1.2.4. Visuaalne programmeerimine	22
1.3. Parameetrilise modelleerimise näited maailmast	24
1.3.1. Arhitektuur	24
1.3.2. Konstruksiooni arvutused	25
1.3.3. Koostöö	27
1.3.4. Energiatõhusus	29
2. LÄHTEMATERJALID JA METOODIKA	30
2.1. Kasutatavad tarkvarad	30
2.1.1. Togl Track	30
2.1.2. Rhino3D/Grasshopper	30
2.1.3. Tekla Structures	30
2.1.4. Karamba3D	31
2.1.5. Microsoft Excel	31
2.1.6. Ftool	31
2.2. Analüüsi ülesehitus	31
2.2.1. Tarkvarade õppimisele kuluv aeg	31
2.3. Parameetrilise geomeetria mudel ja ühilduvus	32
2.3.1. Eesmärk ja ülesehitus	32
2.3.2. Parameetrilise geomeetria loomise lähteülesanne	33
2.3.3. Geomeetria loomise meetoodika	33
2.4. Parameetrilise arvutusmudeli ajaline võrdlus käsitsiarvutusega	33
2.4.1. Ülesehitus ja eesmärk	33
2.4.2. Ettevalmistus	34
2.4.3. Lähteülesanne	34
2.4.4. Parameetiline arvutusmudel	35

2.4.5. Arvutused kasutades ehitusmehaanikat	43
2.4.6. Võrdlemise alused	54
3. TÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU	55
3.1. Ettevalmistused	55
3.2. Parameetrilise geomeetria mudel	56
3.2.1. Eeldefineeritud komponentide abil loodud geomeetria	56
3.2.2. Püütoni skripti kasutamine Grasshopperi komponendina	58
3.3. Parameetriline arvutusmudel	61
3.4. Jõumeetodi arvutused Excelis	67
3.5. Võrdlus	69
3.6. Tulemuste tõlgendamine	72
KOKKUVÕTE	73
KASUTATUD KIRJANDUS	76
LISAD	79
LISA 1 – Parameetrilise geomeetria mudel	80

TERMINID JA AKRONÜÜMID

Algoritm – samm-sammuline tegevusjuhis, juhend või eeskiri mingi tegevuse sooritamiseks.

Algoritmiline disain – algoritmide kasutamine geomeetria loomiseks.

Algoritmiline mudel – geomeetria, mis on määratud algoritmide abil.

Baasmudel – algne mudel, millele on võimalik muudatusi ja täiendusi teha.

BIM (*Building Information Modelling*) – ehitusinformatsiooni mudel, modelleerimine, juhtimine.

CAD (*Computer Aided Design*) – arvutipõhine disain, arvutite kasutamine visuaalse info loomiseks ja muutmiseks.

Generatiivne disain – disainiprotsess, mille käigus arvuti tekitab kõik võimalikud lahendused, mis rahuldavad seatud eeltingimusi.

Digitaliseerimine – digitaal- või arvutitehnoloogia kasutuselevõtmine või kasutamise suurendamine organisatsioonis, tööstuses või riigis.

Eksport – tarkvarasiseste andmete väljaviimine (teise tarkvarasse).

IDE (*Integrated Development Environment*) – integreeritud arenduskeskkond, programmeerija põhitöövahend, kus on kõik vahendid mugavalt koodi kirjutamiseks.

Import – tarkvaraväliste (teisest tarkvarast) andmete sissetoomine.

LEM (Lõplike elementide meetod) – numbriline arvutusmeetod insener-tehniliste ja füüsikaliste probleemide lahendamiseks.

List – andmetüüp loetelude esitamiseks.

NURBS (*Non-uniform rational basis spline*) – matemaatiline mudel, mida kasutatakse kahe- ja kolmemõõtmeliste objektide loomiseks.

Parameetriline disain – parameetriliste seoste kasutamine geomeetria loomiseks.

Parameetriline mudel – parameetritega muudetav geomeetriline mudel.

Pistikprogramm (*Plugin*) – tarkvaramoodul, mis annab mõnele teisele tarkvarasüsteemile lisavõimalusi.

Püüton – tekstiline programmeerimiskeel.

RSA (*Robot Structural Analysis*) – lõplike elementide meetodil põhinev arvutustarkvara, mille arendajas on Autodesk.

Skript – programmi sisaldav tekstifail.

SISSEJUHATUS

Projektimuudatuste rohkus, madal koostöötase ning nendega kaasnev ajakulu on projekteerimisvaldkonna peamiseks probleemideks. Ehitusinformatsiooni modelleerimise (BIM – *Building Information Modelling*) kasutusele võtmisega on tehtud edusamme projektmuudatuste arvu vähendamisel, kuid võttes kasutusele parameetrilise modelleerimise tarkvara on võimalik oluliselt vähendada projektmuudatusele kuluvat aega.

Uute tarkvarade kiiremat kasutusele võtmist peetakse kõige kõrgema potentsiaaliga ehitussektori tootlikkuse tõstmise viisiks [1]. Ettevõtte siseselt peetakse tootlikkuse tõstmise kõige suuremaks takistuseks oskusliku tööjõu vähesust [1]. Tehnoloogilist innovatsiooni pidurdab tööjõu väljakoolitamise kulukus, seega peab kulude vähendamiseks olema tarkvara lihtne kasutada.

Lõputöö eesmärgiks on uurida valitud tarkvarade võimalusi projekteerimise efektiivsuse tõstmisel ning analüüsida tarkvarade õppimisele ja kasutamisele kuluvat aega.

Lõputöö koosneb kirjanduse ülevaatest ja analüüsist ning sellega seotud praktilistest mudelitest:

Kirjanduse ülevaate ja analüüsi eesmärk on anda ülevaade infotehnoloogiliste lahenduste kasutamisevõimalustest projekteerimisvaldkonna digitaalseks kaasajastamiseks. Selle eesmärgi nimel tutvustatakse infotehnoloogilise arengu tausta, parameetrilise modelleerimise olemust ning tuuakse näiteid parameetrilise modelleerimise edukast rakendamisest.

Põhiliselt keskendub töö autor võimalikele praktilistele rakendustele ning nende kasutuselevõtmise teostatavusele. Teoreetilises osas tutvustatakse ka töövõtteid parameetrilist modelleerimist võimaldava tarkvara kasutamisel.

Analüüsi osas valmib kaks praktilist mudelit, mis on loodud parameetriliselt. Nende koostamise läbi uurib autor tarkvara õppimisele ja mudelite koostamisele kuluvat aega ning valminud mudeli väljundi kvaliteeti. Eesmärgiks on hinnata valitud tarkvaralahenduste kasutusele võtmise põhjendatust. Esimese mudeli eesmärgiks on luua

parameetriline geomeetria ning ühildada seda levinud projekteerimistarkvaraga. Teise mudeli eesmärk on ühendada parameetriline mudel arvutustarkvaraga ning hinnata arvutusmudeli koostamisele kulunud aega võrreldes alternatiivse arvutusmeetodiga.

1. EHITUSVALDKONNA INFOTEHNOLOOGILINE ARENG

1.1. Ehitussektori tootlikkuse taust

1.1.1. Ehitussektori madal tootlikkus

Ebapiisav investering teadus- ja arendustegevusse on üks ehitussektori suuremaid nõrkusi [2]. See on üks vähem digitaliseeritud sektoreid stagneerunud või langeva tootlikkusega [3] ning selle tulemuseks on madalad kasumimäärad ja probleemid koostöö korraldamisel [4]. Viimase kahekümne aasta jooksul on sektori aastase tootlikkuse määr tõusnud kõigest 1 % [5]. Tootlikkuse tõstmisel seisavad ees mitmed väljakutsed, millega toimetulemine ettevõtte tasandil on keeruline.

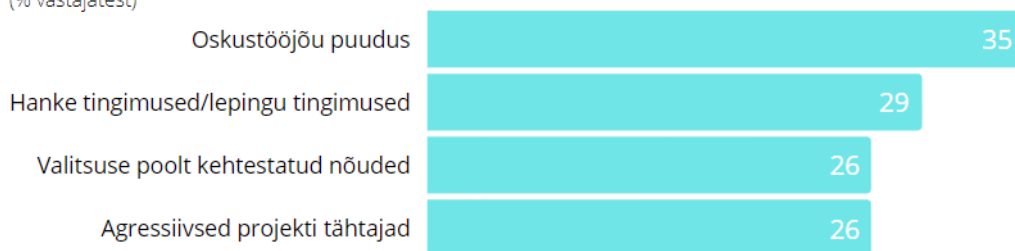
Tootlikkuse probleeme ehitussektoris on käsitletud viimaste aastakümnete jooksul korduvalt. Ühendkuningriikide Auditiameti poolt 2001. aastal väljastatud aruandes *Modernising Construction* [6] uuriti põhjalikult Ühendkuningriikide ehitussektori kaasajastamise võimalusi. Seal välja toodud probleemid ja murekohad ei olnud lokaalsed, ka teistes riikides viidi läbi sarnaseid uurimusi ehitussektori kaasajastamiseks. Üle kümne aasta hiljem käsitleti samu probleeme, The Economist Intelligence Unit poolt 2015. aastal väljastatud aruandes *Rethinking productivity across the construction industry: the challenge of change* [1] uuriti ehitussektori ülemaailmse madala tootlikkuse põhjustajaid ning tippfirmade poolt sellega toime tulemiseks kasutatavaid vahendeid ja strateegiaid. Kuna väljakutsed on ulatuslikud ning ehitusvaldkond koosneb paljudest erinevate huvidega osapooltest, siis võib eeldada, et samad probleemid on aktuaalsed ka tänapäeval ning lähitulevikus.

Üks suuremaid väljakutseid tootlikkuse tõstmisel ehitusvaldkonnas on oskustööjõu vähesus. Ühendkuningriikides langes sisseastumine ehitusega seotud erialadele aastate 1994 ja 1998 vahemikus 26% [6]. Aastatel 2007 kuni 2012 toimunud majanduslanguse tõttu vahetasid paljud ehitusvaldkonna spetsialistid töövaldkonda ning ehituserialade õppimine kaotas populaarsust [1]. Mõlema perioodi järgselt täheldati ehitusettevõtetes suurenenud oskustööjõu puudust, mis põhjustab probleeme mahukamate ja kaugemal asuvate projektide vastu võtmisel ning suurendab riski projektide edukal elluviimisel. Globaalselt

juhtivate ettevõtete kogenud töötajate seas läbi viidud küsitluses 2015. aastal nimetati oskusliku tööjõu vähesust suurimaks väljakutseks ettevõtte sisesse tootlikkuse tõstmisel (Joonis 1). Järgnevalt nimetati suuremateks väljakutseteks klientide poolt valitud hankemeetodid ja lepingutingimused, valitsuse poolt kehtestatud nõuded ning agressiivsed projektitähitajad (Joonis 1).

Milline järgnevatest faktoritest on suurimaks takistuseks teie ettevõttes tootlikkuse suurendamiseks?

Kuni kolm valikut.
(% vastajatest)



Joonis 1. Takistused tootlikkuse suurendamisel [1].

Investeerimine ehitusvaldkonna teadus- ja arendustegevusse on läbi aastate olnud madal. 1999/2000 oli Ühendkuningriikide ehitustööstuse käibeks 65 miljardit naela ning kõigest 270 miljonit sellest (0,4%) kulutati teadus- ja arendustegevuse peale [6]. Investeeringute poolt rahastatud arendustegevusest enamus oli tellitud ehitusmaterjalide ja -süsteemide tootjate poolt [6]. Ka 2010. aastal nimetati vähest investeermist ehituse teadus- ja arendustegevusse üheks ehitussektori suuremaks nõrkuseks [2] ning 2016. aastal toodi välja, et ehitussektor on üks vähim digitaliseeritud sektoritest, mille tootlikkus on püsinud samal tasemel või langenud [3]. Juhtivates ettevõtetes töötavad professionaalid tunnistavad seda probleemi ning hindavad investeermiskapitali vähesust kõige suuremaks takistuseks ettevõtte siseselt tootlikkuse suurendamisel (Joonis 2). Lisaks sellele toodi takistusteks välja ka puudulikku suhtlust ja koostööd ning koolitusresursside ebapiisavust (Joonis 2).

Milline järgnevatest koostööga seotud teguritest on suurimaks takistuseks teie ettevõttes tootlikkuse suurendamiseks?

(% vastajatest)

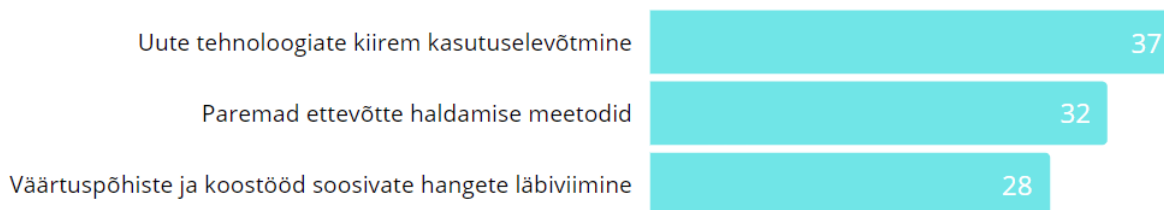


Joonis 2. Koostööga seotud takistused tootlikkuse suurendamisel [1].

Infotehnoloogia kasutusele võtmine on järjepidevalt olnud oluliseks uurimissuunaks ehitusvaldkonnas. 2001. aastal juba tunnistati, et infotehnoloogia suurendatud kasutusel on märkimisväärne potentsiaal ehitussektori efektiivsuse tõstmisel [6]. 2008. aasta artiklis *The potential contribution of small firms to innovation in the built environment* [7] väidetakse, et ehitussektori jätkuvate probleemide lahendused peituvad tugeva innovatsioonikultuuri püstitamisel, mis parandaks innovatsiooni kvaliteeti ja tempot. Ka 2015 aastal oma ala tipp-professionaalide seas läbiviidud küsimustikus arvati uute tehnoloogiate kiirem kasutuselevõtt olema kõige suurema potentsiaaliga tootlikkuse suurendamisel (Joonis 3). Suure potentsiaaliga peeti ka juhtimistavade parendamist ja paremaid väärtuspõhiseid hanketingimusi (Joonis 3).

Milline alljärgnevatest omab kõige suuremat potentsiaali ehitussektori tootlikkuse parandamisel?

(% vastajatest)



Joonis 3. Potentsiaalsed lahendused ehitussektori tootlikkuse suurendamiseks [1].

Ehitussektori madalat tootlikkust põhjustavad probleemid on süsteemi sügavalt juurdunud ning seotud projektide läbiviimise protsessiga. Seda väidet toetab probleemide püsivus läbi aastate, pakutavate lahenduste ebaefektiivsus ning innovatsiooni aeglane tempo.

Individuaalsed ettevõtted on väga piiratud nende probleemide lahendamisel ning soovitavaks suureks arenguks on vaja ehitusvaldkonna üleseid muudatusi.

1.1.2. Tootlikkuse tõstmine BIMi abil

Ehitusinformatsiooni modelleerimise (BIM) kasutusele võtmine märgib ehitustööstuse digitaliseerimise algust [4]. Ehitussektori kaasajastamiseks on üleeuroopalise koostöö tulemusena välja töötatud riiklikud BIM tegevuskavad. Avaliku sektori tellijal on võime oluliselt mõjutada kogu ehitustööstust [4]. BIMi nõuete kehtestamine avaliku sektori projektides valmistab ehitussektorit ette üleminekuks kõikides projektides.

BIMi kirjeldatakse kui projektidega seotud informatsiooni haldusprotsessi, mille eesmärk on koordineerida projekti sisendeid ja väljundeid, kasutades selleks ehitiste füüsiliste ja funktsionaalsete omaduste ühiselt kasutatavaid digitaalseid kirjeldusi [8]. BIMi eduka toimimise eelduseks on seda toetavad hästi välja arendatud tarkvarad. Väga oluline eesmärk BIMi kasutusele võtmisel on parema koostöö tagamine tarkvaraliste lahenduste abil. Seda ning ühtse infokeskkonna loomist selle saavutamiseks on oma magistritöös põhjalikult käsitlenud Hendrik Park [9].

BIMi rakendamine on järk-järguline ja aeglane protsess. Osalt taotluslikult võimaldamaks ehitussektori osapooltel kohanemisaega suurte muudatustega kaasa minemiseks, kuid osalt tingitud ka mitmetest väljakutsetest selle rakendamisel. Ehitustööstuses on kasutusel palju erinevaid tarkvarasid ja andmeformaate ning koostöö korraldamisel võib olulist detailset infot kaduma minna kui informatsioon teisaldatakse ühest keskkonnast teise [10]. Kohati ei ole kitsamate valdkondade jaoks BIM tarkvara arendatud või on saadaolev tarkvara liiga kallis. Kõrge hinna tingib tarkvara suur funktsionaalsus, kuid tihtipeale ei ole kasutajad võimelised kõiki programmi võimalusi ära kasutama. Aastal 2017 läbi viidud uurimuses jõuti järeldusele, et tarkvara toimib kõige paremini kui ühtses (ühe arendaja poolt pakutavas) BIM paketis on rohkem tööriistu ja võimalusi erinevate ülesannete täitmiseks, vajamata informatsiooni teise keskkonda eksportida. Kasutatavatel tarkvaralahendustel on kriitiline roll BIMi edukusel ja efektiivsusel. [10]

BIMi põhine projekteerimisprotsess on oluliselt töömahukam võrreldes traditsioonilise projekteerimisega [10]. See väljendub ka hinnas ning on peamine takistus BIMi ülekandumisel erasektori projektidesse. BIMi eduka toimimise aluseks on aktiivne infotehnoloogiline areng, mis järgneb nõuete kehtestamisele ja uute töövõtete kasutusele

võtmisele. See korvaks BIMi töömahukust ning ühtlustaks lõhet BIMi ja traditsioonilise projekteerimisprotsessi vahel. Kuna ehitustööstuse innovatsioon ja tehnoloogiline areng on aeglane protsess [11], saab hetkel näha vaid töömahtude ja hindade suurenemist. Esimesed firmad, kes on võimelised selle protsessi läbi tegema ja oma ettevõtte siseselt efektiivsust ja tootlikkust suurendama, saavutavad suurema konkurentsivõimelisuse, paremad kasumimarginaalid ning sujuvama koostööprotsessi.

Projekteerimisvaldkonnal on oluline roll ehitustööstuse innovatsiooni juhtimisel. Olles esimene lüli projekteerimis- ja ehitustöövõtus on kõik teised osapooled otseselt mõjutatud projekteerimis- ja konsultatsiooniettevõtete tehnoloogilise ette jõudmise või maha jäämise poolt. Potentsiaalselt võib projekteerimisvaldkonna intensiivne infotehnoloogiline areng põhjustada kõikide teiste valdkondade kiirema arengutempo. Maha jäämine võib samas põhjustada teistele valdkondadele raskusi uute infotehnoloogiliste arenduste kasutusele võtmisel. Euroopa ehitustööstuses on 95% töötajatest hõivatud väikese ja keskmise suurusega ettevõtetes [4]. Innovaatilised arendused on kulukas investering, mille jaoks ehitusettevõtete võimalused on piiratud, seda eriti väiksematel ettevõtetel.

1.1.3. Projekteerimisvaldkonna ettevõtete võimalused

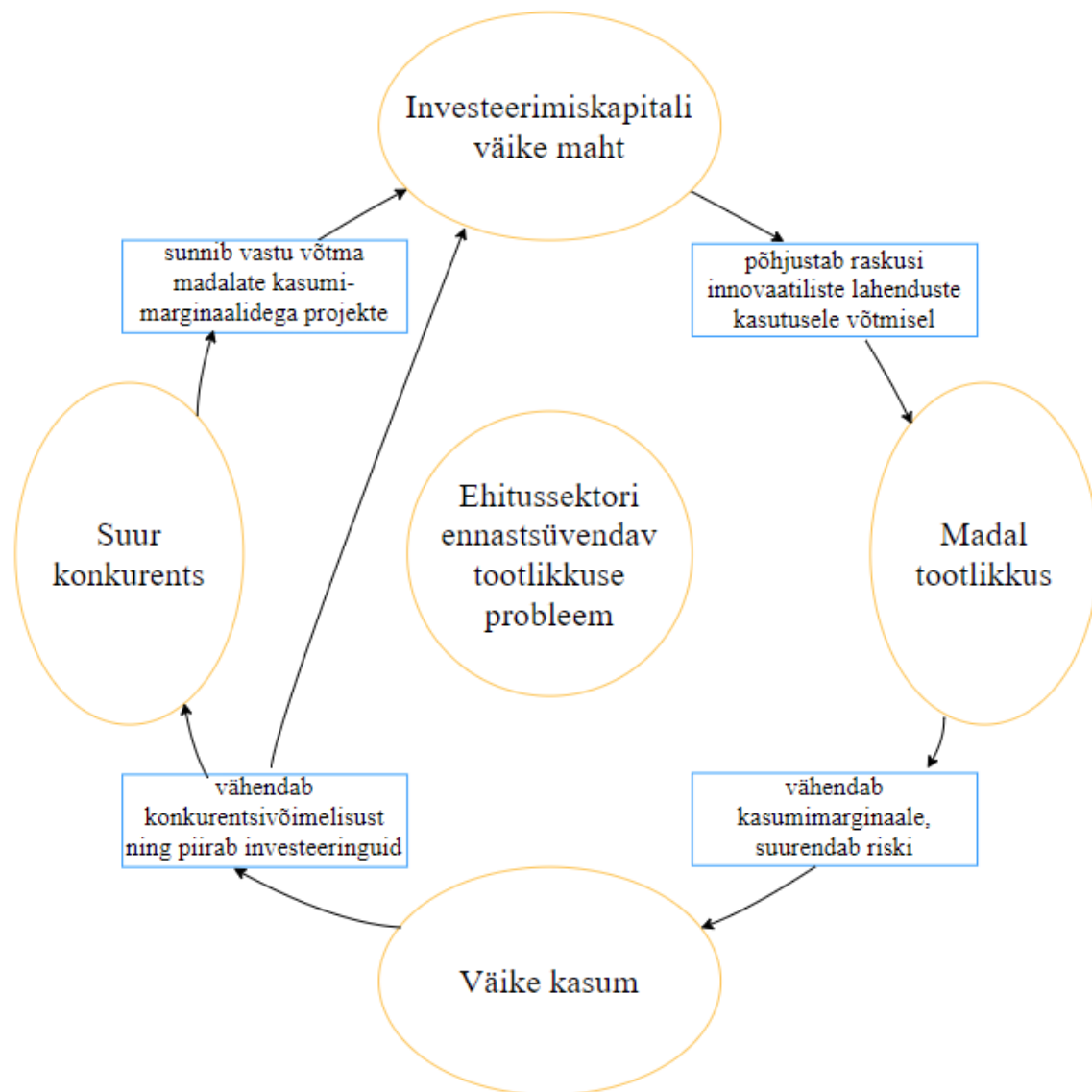
Parim viis ettevõtetel toetada BIMi protsessi ja kiirendada nende väljakutsete lahendamist on võtta omaks innovaatilisi infotehnoloogilisi arendusi ning selle läbi efektiivsemalt täita BIM nõudeid. Selle käigus areneb ka ettevõtte ise – uued tarkvaralahendused omavad suurt potentsiaali tõsta projekteerimisprotsessi efektiivsust ning seeläbi ka firma tootlikkust.

Ehitussektorit on juba pikemat aega kritiseeritud teadus- ja arendustegevuse investeringute väikese mahu ning sellest tuleneva infotehnoloogilise mahajäävuse osas. Infotehnoloogilised arengud ehitussektoris tihti pärinevad teistest valdkondadest, näiteks on suur osa digitaalse modelleerimise edusammudest üle võetud lennundus- ja masinatööstusest [11]. Edasiseks arenguks on vaja ehitussektorile suunatud infotehnoloogilisi lahendusi, kuid ehitusettevõtetel on raskusi neid piisavalt rahastada. Lisaks probleemidele, mis mõjutavad kogu ehitussektorit, peavad ehitusettevõtted toime tulema turutingimustest tulenevate takistustega.

Oskustööjõu vähesus, väikesed ehitusmahud ja suur konkurents sunnib ettevõtteid vastu võtma madalate kasumimarginaalidega projekte. Lisaks sellele on vaja täita valitsuse poolt kehtestatud nõudeid, leppida agressiivsete tähtaegadega ning vastu võtta ebasoodsaid

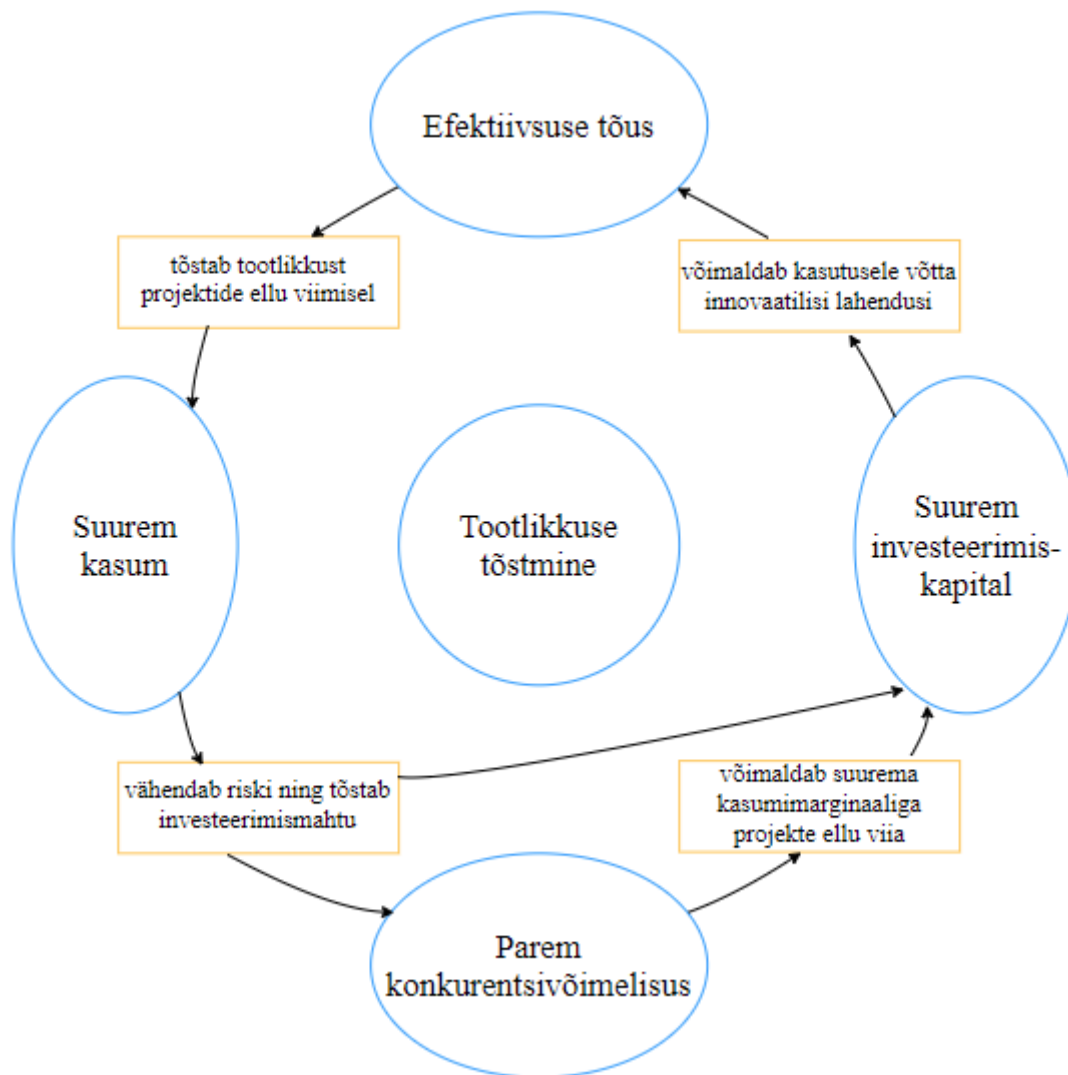
hanke ja lepingu tingimusi. Need takistused põhjustavad madalat tootlikkust, mis ettevõttes omakorda suurendab riski, vähendab kasumimarginaale ning piirab võimekust teha väärtust tõstvaid investeeringuid. Ettevõtte saab tegeleda ainult nende probleemide sümptomite ravimisega, sest turutingimusi pole ettevõtte tasandil võimalik muuta. [1]

Projekteerimisvaldkonna tootlikkuse probleem on ennast süvendav ning moodustab ebaproduktiivsuse nõiaringi (Joonis 4). Suur konkurents sunnib ettevõtteid vastu võtma madalate kasumimarginaalidega projekte [1], mis omakorda vähendab ettevõtte investeerimiskapitali. Ebapiisav investeerimismaht ei võimalda kasutusele võtta uusi tarkvaralahendusi, mille abil õnnestuks ettevõtte tootlikkust tõsta ning madal tootlikkus põhjustab madalamaid kasumimarginaale.



Joonis 4. Tootlikkuse probleemi tsükliline diagramm.

See tsükel võiks töötada ka teistpidi – kui õnnestub investeerida innovaatilistesse lahendustesse suudetakse ettevõtte tootlikkust tõsta, suurema tootlikkusega saab projektide pealt suuremaid kasumeid teenida, mis omakorda lubaks rohkem investeerida ettevõtte arengusse (Joonis 5). Peamine väljakutse selle idealistliku plaani elluviimisel on edukate esimeste investeeringute tegemisel.



Joonis 5. Tootlikkuse tõstmise tsükliline diagramm.

Esimesed investeeringud on seega eelistatavalt odavad ja lühikese tasuvusajaga. Erinevaid tarkvaralahendusi on turul väga palju ning nende seast enda ettevõtte jaoks sobiva välja valimine on keeruline. Seetõttu on oluline uurida tarkvarade kasutamise võimalusi, nende poolt võimaldatavate lahenduste teostatavust ning saadavat kasu. Parim lahendus võib oluliselt varieeruda vastavalt ettevõtete spetsiifikale ning tähtis on info kättesaadavus informeeritud valiku tegemiseks. Kõige olulisemad tegurid on seotud ühel või teisel viisil ajaga. Väljaõppele kulutatud aeg ning saavutatav aja kokkuhoid on otseses sõltuvuses kulude ja tuludega. Seega on ajaga seotud andmed uurimustes väga väärtuslikud.

Eelistatavalt on tarkvaralahendusi lihtne kasutada ja nende õppimiseks kuluv aeg lühike, see annaks võimaluse ka väikestel ettevõtetel neid kasutusele võtta ilma suurt riski kandmata. Järgnevalt on eelistatud tarkvara kasutusele võtmisega saavutatav efektiivsuse

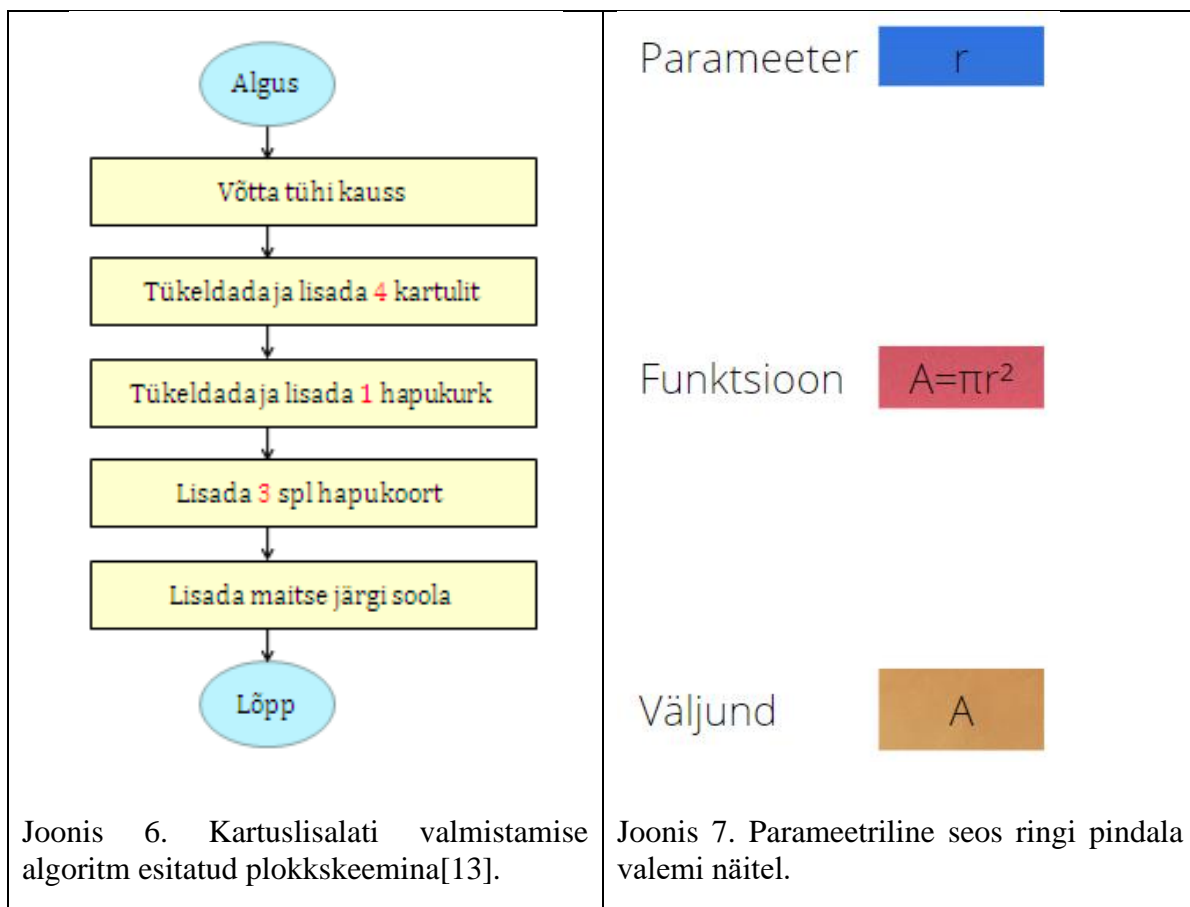
tõus, mis tõstab ka ettevõtte tootlikkust. Suurem tootlikkuse tõus võimaldab kiiremini järgnevaid investeeringuid teha ettevõtte arenguks. Valiku tegemisel võib olla mõistlik kõrgema potentsiaaliga innovatsioonivaldkonnast valida kõige kulusäästlikum tarkvaralahendus. Sellisel juhul on juba esimese investeeringuga alus pandud edasistele investeeringutele.

1.2. Parameetriline modelleerimine

1.2.1. Sissejuhatus, mõisted

Matemaatikas tähendab parameetria võrrandite hulka, mis väljendab arvude kogu funktsioonilist sõltuvust kindlast arvust sõltumatutest muutujatest, mida nimetatakse parameetriteks [12]. Teisisõnu on funktsiooni sisendiks muudetavad suurused ehk parameetrid ja funktsiooni väljundiks olevad tulemused on nendega üksüheses vastavuses (Joonis 7).

Algoritmiks nimetatakse probleemi lahendamiseks vajalikku instruksioonide hulka, mida mehhaaniliselt (st. ilma loovust rakendamata) järgides on võimalik jõuda soovitud tulemuseni. --- Kuna algoritmi järgimine ei nõua loovust, siis on algoritme võimalik tõlkida arvuti jaoks arusaadavale kujule (programm) ja seega saab neid vajadusel käivitada arvutil [13]. Algoritmi graafiliseks kujutamiseks on levinud plokk skeemi kasutamine (Joonis 6).



Parameetriline modelleerimine seega eeldab muudetavate parameetrite olemasolu, mille abil on võimalik mudelit manipuleerida ning algoritmiline modelleerimine eeldab algoritmide kasutamist mudeli loomisel. Praktikas on need mõisted sünonüümsed viidates mudeli loomise viisile, mis hõlmab mõlemaid mõisteid.

Ehitusvaldkonnas, kuid rohkem arhitektuuris on levinud ka generatiivse modelleerimise mõiste. Arvutite arvutusvõimsust ära kasutades on võimalik kiiresti leida paljusid erinevaid lahendeid vastavalt etteantud piirangutele ja kirjutatud algoritmidele. Mudeli parameetritele väärtuste vahemikke ette andes saab arvuti genereerida ja salvestada kõiki läbiproovitud lahendeid, mis rahuldavad seatud piiranguid. See on väga võimekas meetod varajastes projektistaadiumites kiiresti parima lahenduse leidmiseks.[14]

1.2.2. Taust

Parameetrilise modelleerimise tarkvarad on reeglina kasutust leidnud vaid kitsaste valdkondade spetsialistide poolt. Kommertstarkvarana on parameetriline modelleerimine olnud kasutusel juba aastast 1988, kui tuli välja tarkvara nimega Pro/ENGINEER. See

leidis kasutust peamiselt masinatehnoloogia projekteerimis- ja tootmisprotsessides[15]. Teadusartiklid, mis käsitlevad parameetrilist modelleerimist ehitusvaldkonnas on pigem uudsed ning sellest võib järeldada selle uurimisvaldkonna alles hiljutist populaarsust. Põhjuseks võib tuua ehitustööstuse aeglase tehnoloogilise arengu, mida kinnitab sektori vähene digitaliseeritus läbi aastate [11].

Parameetiline funktsionaalsus on jõudnud ka ehitusmodelleerimise tarkvaradesse. Revit oma algusaastatel reklaamis ennast parameetrilise modelleerimise tarkvarana [16]. Selle all peeti silmas funktsionaalsust, mis lubab kasutajal muuta parameetrite arvulisi väärtusi ning parameetrilised seosed muudavad mudelit kõikides olulistes kohtades. Sellised funktsionaalsused on väga abistavad tööriistad projekteerija töövoos, kuid nende seosed on peidetud kasutajaliidese taha. Kasutajal ei ole võimalik neid seoseid muuta ega luua. Parameetrilise modelleerimise tarkvarade innovaatus peitub aga ise seoste loomisel ja selle läbi sobivate reeglitega piiratud geomeetria loomisel. See funktsionaalsus Revitil ja sarnastel modelleerimistarkvaradel puudub. Peale seda kui Revit muutus Autodeski osaks lõpetati parameetrilisuse propageerimine ning edaspidi turundati Revitit kui BIM tarkvara.[15]

Aastate jooksul parameetrilise modelleerimise tarkvarad mitmekesisustid ja arenesid ning hakkasid järjest rohkem kasutust leidma. Visuaalse programmeerimise tarkvarad pakuvad uut viisi parameetrilise mudeli loomiseks ning eesotsas Grasshopperiga on need viimase kümnendi jooksul populaarseks muutunud nii arhitektide kui ka ehitusinseneride seas. CAD (*Computer Aided Design*) pakettidesse lisatakse tihtipeale skriptimise liides, mis võimaldab tekstilise programmeerimiskeele abil lisafunktsioone programmeerida. See on lihtsaks lahenduseks spetsiifiliste funktsioonide programmidesse lisamise vältimiseks, jättes selle töö kasutajale. Tekstiline programmeerimine on aga oskus, mis ei ole ehitusvaldkonna spetsialistide seas levinud, kuna selle omandamine nõuab liiga palju aega. Sellest on ka tingitud visuaalse programmeerimise kasvav populaarsus.

Kuna eelpool mainitud tehnoloogilised lahendused ei ole tänapäevani laialdaselt kasutusel loetakse neid pikast ajaloost hoolimata innovaatilisteks lahendusteks.

1.2.3. Parameetriliste seoste võimalused

Parameetriliste seoste loomisel võib üheks suurimaks takistuseks olla loovus. Algoritmid peavad olema kirjutatud ilma loovust kasutamata, muidu ei ole nende abil võimalik

programme luua. Igapäevatöös võimaldab loovuse kasutamine tööd lihtsustada ja aega kokku hoida. Üldjuhul on võimalik tööülesandeid täita ilma loovust kasutamata, kuid tihtipeale nõuab see rohkem aega. Projekteerija mõtteprotsess on üldjuhul iseenesest algoritmiline ning vaja oleks vaid aega kulutada selle arvuti jaoks tõlkimiseks.

Parameetriliste seostega on võimalik automatiseerida palju ülesandeid, kui vaid suuta neist loovus eraldada. Enamik ajast peab projekteerija seda nagunii tegema. Geomeetria loomisel on sageli ranged seosed kasutusel ning vabavormilisi geomeetriaid kasutatakse harva. Nii hoone kujule kui mõõtmetele on võimalik määrata parameetrid ning üldjuhul on nad omavahel seotud lihtsate ja loogiliste seoste abil. Projekteerimisel tehtavad arvutused on samuti kindla metoodikaga ja üheainsa õige vastusega. Arvutustulemused määravad ära elementide mõõdud ja muud omadused. Loovus leiab vähe asjakohast kasutust projekteerimisprotsessis ning terve projekti parametrizeerimist takistab vaid selle ettevõtmise keerukus.

Praktikas toob üleparametrizeerimine rohkem kahju kui kasu. Liigne seoste ja parameetrite sisestamine võib mudeli muuta liiga paindumatuks või kogunisti põhjustada programmi kokkujooksmist. Iga mudeli puhul tuleks leida optimaalne parameetrite hulk, mis lubab hoone olulisi omadusi muuta ning vähemtähtsad omadused, mille muutmise vajadus on palju väiksem, määrata konstantse väärtusega. Oluline on saavutada projekti vajadustele vastav tasakaal seoste poolt loodava funktsionaalsuse ja nende puudumisest võimaldatava paindlikkuse vahel. Õigesti kasutades saab parameetrilise modelleerimise ja sellega seotud tövõtete kasutamise abil saavutada olulist efektiivsuse tõusu projekteerimises.

Parameetrilise modelleerimise algoritmilise ülesehituse tõttu on programmeerimine selle väga oluline osa. Selle abil saab efektiivselt kontrollida mudeli sisendeid ja väljundeid ning neid vajadusel ka manipuleerida. Programmeerimist kasutades saab efektiivsemalt teisendada mudelit sobivasse andmeformaati ning vähendada infokadu andmevahetusel. Koostöö tegemisel on sageli vaja mudelit jagada teiste valdkondadega ning BIMi projekti korral ka ühtsesse infokeskkonda üles laadida.

Parameetrilise modelleerimise efektiivseks kasutamiseks tuleks seda kaasata juba projekti varajastes etappides. Seega võib projekteerimise efektiivsust tõsta ühise parameetrilise baasmudeli kasutamine. Hoone oluliste osade jaoks koostatud parameetriline mudel oleks seotud kõikide osapoolte järgneva projekteerimisega ning tehtavad muudatused kajastuksid

kõikide osapoolte töös. Sellise projekti läbiviimise meetodiga oleks võimalik saavutada märkimisväärne aja kokkuhoid ning ära hoida korduva töö tegemine. Sellist metoodikat on kasutatud mitme mastaapse objekti projekteerimiseks alternatiivina BIMile [17]. Selle abil saavutati üksikasjalikum ja suurema eristatavusega ehitusprojekt, mida poleks BIMi abil olnud võimalik saavutada [17].

1.2.4. Visuaalne programmeerimine

Parameetriliste seoste loomine eeldab algoritmilist mõtlemist ja oskust seosed arvuti jaoks arusaadavale kujule kirja panna. Kuid tekstiliste programmeerimiskeelte (Joonis 8) õppimine võib olla ehitusvaldkonna projekteerijatele suureks takistuseks. Erialast haridust omandades programmeerimist üldjuhul ei õpetata ning omal käel õppimine on liiga ajamahukas.

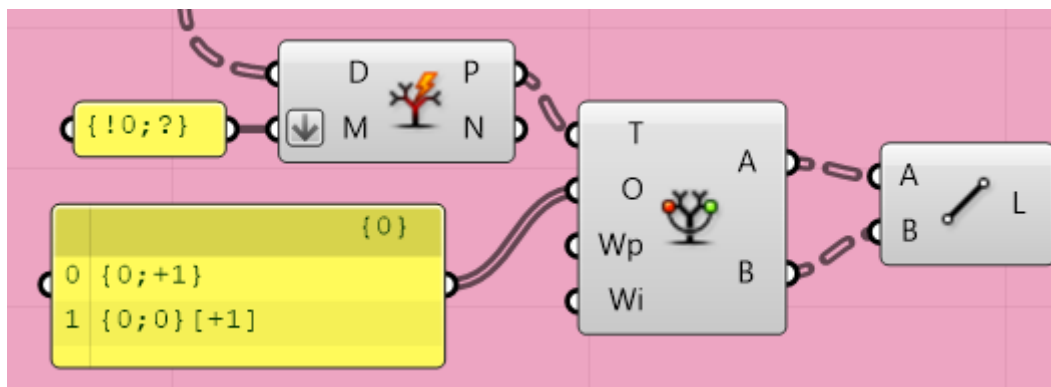
```

1  import rhinoscriptsyntax as rs
2  a=[]
3  for i in range(nx+1):
4      ....for j in range(ny+1):
5          .....for k in range(0,2):
6              .....a.append(rs.AddPoint(i*u+x,j*v+y,k*s1+z))
7          .....for k in range(1,nz):
8              .....a.append(rs.AddPoint(i*u+x,j*v+y,k*w+z+s1))

```

Joonis 8. Näide tekstilisest programmeerimisest (Püüton).

Visuaalse programmeerimise tarkvarad võimaldavad kasutada ettemääratud funktsioone ja neid omavahel ühendades luua programm, mis on esitatud ühesuunalise diagrammi kujul (Joonis 9). Selline graafiline kasutajaliides teeb programmi toimimise põhimõtted arusaadavamaks ning aitab projekteerijatel lihtsamini ja kiiremini programmeerimist õppida.



Joonis 9. Programmiosa Grasshopperis, esitatud diagrammina.

Visuaalse programmeerimise tarkvarad leiavad oma kasutuslihtsuse tõttu palju kasutust koolides programmeerimise algtõdede õpetamisel, näiteks Scratch'i kasutatakse juba algkooli tasemel laste õpetamiseks [18], kuid üleminek tekstilistele programmeerimiskeeltele ei ole ilmtingimata vajalik. Tarkvarad nagu Grasshopper ja Dynamo pakuvad tõhusaid geomeetria loomise funktsioone, mida paljud projekteerijad ja disainerid kasutavad oma töös 3D mudelite loomisel. Lisaks on neil olemas ka funktsioone keerulisteks matemaatika- ja loogikateheteks, andmete töötlemiseks, tulemuste visualiseerimiseks ja paljuks muuks. Seal loodavad programmid töötavad edukalt koos tekstiliste programmiosadega ning vajadusel saab skripti kirjutamisega puuduoleva funktsionaalsuse lisada. Skriptide abil on võimalik ise juurde kirjutada pistikprogramme uute visuaalse programmeerimise funktsioonidega. Ametlikult leheküljelt saab alla laadida kasutajate poolt loodud pistikprogramme ning neid enda töös kasutada, laiendades oma mudelite funktsionaalsust [19].

Üks suurimaid eeliseid, mida visuaalne programmeerimine skriptimise üle omab on interaktiivsus. Programmi loomisel või täiustamisel saadav kohene tagasiside mudeli muutumise kohta teeb vigade parandamise ja programmi täiustamise märgatavalt lihtsamaks. Keerulisemate mudelite puhul võib arvutusaeg aga osutuda tunduvalt pikemaks kui tekstiliste programmide kasutamisel. Sellisel juhul ei saa kasu mudeli interaktiivsusest ning eelis jääb kiiremini töötavatele tekstipõhistele keeltele. Visuaalse programmeerimisega loodud mudelid ei ole ka nii paindlikud kui skriptide abil loodud mudelid. Keeruliste mudelite puhul on paindumatus veelgi piiravam. Vähene paindlikkus lihtsustab programmi kasutamist ning kasutuslihtsus on peamine põhjus, miks visuaalne programmeerimine on projekteerijate seas populaarsem kui tekstiline programmeerimine. Skriptimise õppimine nõuab rohkem aega, kuid keerukamate objektide kallal töötades tasub see aeg kiiresti ennast ära.[17]

Tekstilised programmeerimiskeeled võimaldavad luua paindlikkemaid, kiiremini töötavaid programme [17]. Visuaalsete programmeerimiskeelte populaarsus nende alternatiivina näitab kui oluline on kasutuslihtsus teatud grupi kasutajate jaoks. Ehitus on niivõrd lai valdkond, et selle ala spetsialistid osalevad kohustuslikus korras erialastel koolitustel kogu oma karjääri jooksul. Erialaga seonduv infohulk on niivõrd suur, et valdkonnaga mitteseotud oskuste arendamiseks on keeruline aega leida. Visuaalne programmeerimine on oma kasutuslihtsuse tõttu õpitav lühikese ajaga ja selle funktsionaalsus on piisavalt hea,

et mitte vajada üleminekut tekstiliste programmeerimiskeelte peale. Kui aga on vajadus õppida tekstilist programmeerimist (näiteks suurte ja keeruliste objektide puhul), siis annab visuaalne programmeerimine hea aluse programmeerimise põhitõdede kohta, et protsessi kiirendada. Visuaalne programmeerimine on kõrge potentsiaaliga, kiirelt omandatav oskus ning võiks saada oluliseks osaks ehitusinseneride väljaõppest.

1.3. Parameetrilise modelleerimise näited maailmast

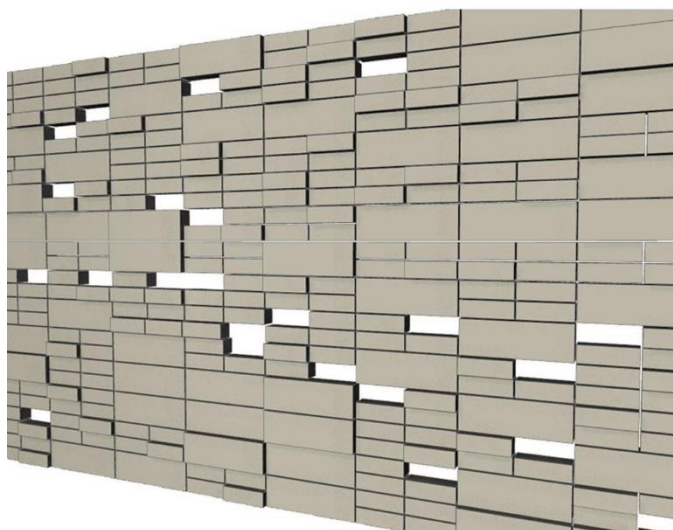
Selles peatükis käsitletakse näiteid parameetrilise modelleerimisega seotud tarkvarade ja meetodite kasutamisest erinevate eesmärkide saavutamiseks. Peatüki eesmärgiks on näidata parameetrilise modelleerimise laiahaardelisust, praktilist teostatavust ning tulemuslikkust.

1.3.1. Arhitektuur

See peatükk põhineb 2019. aastal läbi viidud uurimusel, kus uuriti algoritmilise modelleerimise võimalusi arhitekturse projekteerimisprotsessi efektiivsuse tõstmisel [20].

Algoritmiline BIM on lähenemine, mis seob omavahel algoritmilise projekteerimise ja BIMi üksteist täiendavaks kombineeritud tarkvaralahenduseks. Algoritmiline modelleerimine integreeriti traditsioonilist BIMi põhist projekteerimisprotsessi praktiseerivatesse arhitektuurbüroodesse ning hinnati selle praktilise rakendamise efektiivsust. Ettevõtetele, kellega koostööd tehti puudus kogemus algoritmilise projekteerimisega ning seetõttu kaasati projekteerimisprotsessi vastava kogemusega spetsialistid.

Arhitektidel oli vaja projekteerida geomeetriselt keeruline fassaadisüsteem, mis vastaks nende arhitektuurilisele visioonile. Fassaadisüsteem (Joonis 10) koosnes mitmetest ebastandardsete mõõtmetega elementidest, mis olid omavahel ebakorrapäraselt paigutatud. Traditsiooniliste töövõtetele oleks olnud väga keeruline jõuda lahenduseni, mis oleks kooskõlas arhitektide nägemusega arvestades, et projekti tähtajani oli jäänud kõigest 6 päeva. Ajanappuse tõttu tehti koostööd uurimisrühmaga, kasutades algoritmilise projekteerimise ja traditsioonilise BIM projekteerimise töövõtete kooslust, eesmärgiga tõsta töö efektiivsust ning jõuda seeläbi parima lahenduseni.



Joonis 10. Fassaadisüsteemi keerukas muster [20].

Fassaadisüsteemi modelleerimiseks loodi uurimisrühma poolt algoritmid, mis vastasid arhitektide visioonile ning tekitasid erinevaid mustreid valitud parameetrite abil. Algoritmide koostamiseks kasutati integreeritud arenduskeskkonda (IDE – *Integrated Development Environment*) Rosetta ning genereeritud fassaadimustrid visualiseeriti AutoCADis, kuna arvutused on seal kiiremad kui BIM tarkvarades. Arhitektid andsid tagasisidet tekitatud mustrite kohta ning peale õige lahenduse leidmist, saadeti info Revitisse, kus see lisati arhitektide poolt koostatud projektile.

Kiirest tähtjast hoolimata jõuti optimaalse arhitektuurilise lahenduseni suuresti tänu parameetrilise modelleerimise võimekuse kasutamisele. Kuna fassaadi geomeetria oli täpselt ja parameetriliselt koostatud, siis oli võimalik automaatselt genereerida tootejoonised iga fassaadidetaili kohta ning saata need tehasesse samuti enne tähtaega. Uue tarkvaralahenduse kasutusele võtmisega õnnestus vältida nii tähtaja ületamist kui ka kiirustamisest tekkivaid vigu.

1.3.2. Konstruksiooni arvutused

See peatükk põhineb 2019. aastal avaldatud artiklil, kus uuriti konstruksiooni arvutuste tegemise ja kontrollimise kvaliteeti, efektiivsust ja automatiseeritust [21].

Artiklis keskenduti järgnevatele küsimustele:

- 1) Kas projekteerimises on võimalik kandevõime automaatse kontrolli jaoks rakendada kvaliteetset süsteemi?

- 2) Kui kasutada ära reeglipõhise kontrolli potentsiaali, kas on võimalik tagada kvaliteeti?
- 3) Kas ollakse võimalised identifitseerima optimaalne tasakaal manuaalse ja automaatse kontrolli vahel?

BIMi areng on loonud tugeva aluse projekteerimisprotsessis kvaliteetse informatsiooni kasutamiseks, mis avab võimalusi arvutuste automatiseeritust täiustada. Automaatne arvutuste kontroll võimaldab kiirelt saada teavet projekti nõuetele vastavuse kohta ettemääratud tingimustele. Selle kontrolli tulemuste usaldusväärsusust on vaja aga eksperdil üle hinnata. Praktika näitab, et manuaalse kontrollimise kognitiivsed väljakutsed on niivõrd suured, et isegi kogenud professionaalid ei ole järjekindlalt edukad ning tuvastavad ainult väikese osa vigadest. Kvaliteedikontrolli rakendatakse ebaühtlaselt ning vaja oleks leida sobiv tasakaal manuaalse ja automaatse kontrolli vahel.

Kirjanduse analüüsis käsitleti kahte juhtivat suunda automaatse kontrolli loomisel. Üks neist keskendus standardite ja normide tõlkimisele arvutile arusaadavaks kujuks (programmideks) ning teine keele tõlkimise tarkvarade kasutamisele programmi treenimiseks standarditest ja normidest aru saama. Mõlema meetodi puuduseks on vajadus projekteerijal kontrollida tarkvara tööd, kuid uurijate sihteesmärgiks oli süsteem täielikult automatiseerida. Hinnati ka erinevaid tarkvarasid ning viidi läbi intervjuusid erinevate ehitustööstuse professionaalidega.

Uurimistöö tulemusena leiti osaliselt vastused esitatud küsimustele:

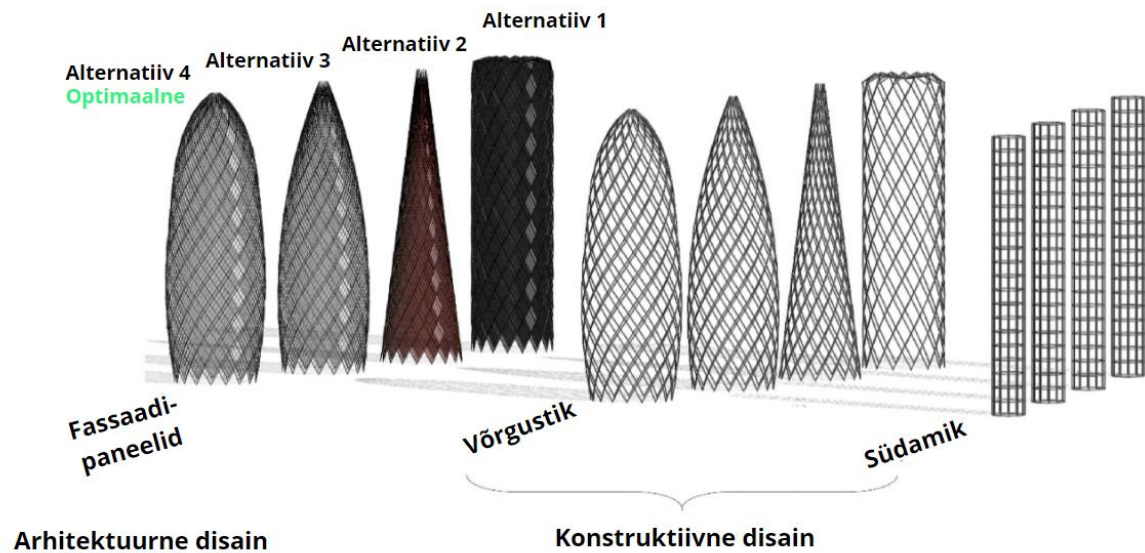
- 1) Projekteerimise kvaliteedi üle avaldati muret ka intervjuudes. Liigselt tuginetakse manuaalsetele arvutustele ja kontrollile ning täheldati, et ainult vähesed professionaalid kasutavad pool-automaatseid meetodeid ning arvati, et paikapandud kvaliteedikontrolli raamistikku ei olnud õnnestunud edukalt rakendada.
- 2) Tagasisidest ilmnas, et projekteerijad näevad poolautomaatses kontrollis potentsiaali, kuid protsessi keerukuse, kehvade tarkvaravalikute ning vastavate oskustega tööjõu vähesuse tõttu leiab see vähest rakendamist.
- 3) Sobivat tasakaalu automatiseerimise ja manuaalse kontrolli vahel ei suudetud leida täheldades, et teatud määral on manuaalset kontrolli alati vaja, kuid jõuti järeldusele, et nii tootlikkuse kui kvaliteedi tõus on lähedalt seotud automaatse kontrolli edukama rakendamisega.

1.3.3. Koostöö

See peatükk põhineb 2020. aastal avaldatud artiklil, mille eesmärgiks oli täiustada arhitektide ja inseneride vahelist koostööd, luues ühendus projekti arhitektuurse ja konstruktiivse mudeli vahel [22].

BIMi laialdasest levikust hoolimata on arhitektide ja inseneride vaheline koostöötase madal. See võib põhjustada olukordi, kus arhitekti loovus ei ole kooskõlas projekti teostatavusega ning lahenduse leidmine põhjustab aja- ja kvaliteedikadu. Artikkel käsitleb uut metoodikat arhitektide ja inseneride vahelise koostöö korraldamiseks. Traditsioonilise ühesuunalise töövoos asemel teeksid arhitektid ja insenerid koostööd kogu projekteerimisprotsessi vältel, saades kohest tagasisidet tehtud muudatuste kohta.

Parema koostöö saavutamiseks otsustati arhitekti ja konstruktori mudelid ühendada visuaalse programmeerimise tarkvara abil. Arhitektide poolt loodud Reviti mudel ühendati Dynamoga, kus sellele määrati parameetrilised seosed geomeetria kontrollimiseks. Dynamo mudel omakorda ühendati Robot Structural Analysis (RSA) arvutustarkvaraga, mis viis läbi hoone kandevõimearvutusi. Tehtavad muudatused arhitektuurses mudelis kajastusid ka RSA (*Robot Structural Analysis*) mudelis ning automaatselt optimeeriti hoone kandvad elemendid. Tehtavate muudatuste mõju kohta saadud kohene tagasiside võimaldas analüüsida mitmeid erinevaid lahendusi hoone geomeetria loomisel (Joonis 11). Uurimus viidi läbi Gherkini torni näitel, mis on Londoni üks tuntumaid kaasaegse arhitektuuri näiteid (Joonis 12).



Joonis 11. Gherkini torni kuju optimeerimine [22].



Joonis 12. Gherkini torn Londonis [23].

Tulemuseks oli edukas koostöö keerulise kõrghoone projekteerimisel, kus optimeerimist õnnestus läbi viia kolmel tasemel – kuju, tüpoloogia ja (elementide) suuruse jaoks. Optimeerimine viidi läbi kandevõimevaru, maksumust ja arhitekturseid kaalutlusi arvesse võttes. Praktilise uurimuse tulemuseks on demonstratiivne näide projekteerimisprotsessi efektiivsuse tõstmisest parameetrilise modelleerimise kasutamisega.

1.3.4. Energiatõhusus

See peatükk põhineb 2017. aastal avaldatud artiklil, mis käsitleb energiatõhususe integreerimist projekteerimisprotsessi [24].

Säästva ja jätkusuutliku arengu põhimõtted on ehitussektoris väga olulisele kohale tõusnud. See on põhjustanud tarkvaralahenduste arenemise projekteerimisprotsessi uue keskkonnasõbraliku suuna arvestamiseks. Energiatõhususe simulatsioonitarkvarad on olemas olnud juba aastaid, kuid varasemalt ei kasutatud neid mitmete takistuste tõttu. Tarkvara kõrge hind, vajalike oskustega tööjõu puudus ning vähene huvi klientide poolt heidutasid arhitekte neid lahendusi proovimast. Tänapäevaks on tarkvarad oluliselt edasi arenenud ning kasutuslihtsus on suurenenud. Keskkonnapoliitika tõttu on märgatavalt tõusnud ka tellija huvi energiatõhususe vastu. Artiklis uuriti generatiivse disaini võimalusi ja piiranguid, tutvustades uusi töövõtteid energiatõhususe simulatsiooni integreerimisega.

Uurijate ettepanekuks oli varajastes projektistaadiumites geomeetria parametrizeerida ning siduda energiatõhususe simulatsiooni tarkvaraga. See koostöö võimaldaks analüüsida erinevaid arhitektuurseid lahendusi ja nende energiatõhusust. Selleks kasutati Rhinoceros3D modelleerimistarkvara, Grasshopperi visuaalse programmeerimise keskkonda ning mitmeid selle juurde kuuluvaid pistikprogramme.

Tulemuseks tunnustati nimetatud tarkvaralahenduste kombinatsiooni kasutamisest tulenevat suurt potentsiaali, kuid nenditi ka vajadust teemat põhjalikumalt uurida. Lisaks märgiti, et tarkvarade kasutajasõbralikkus mängib olulist rolli projekteerimisprotsessi revolutsioneerimisel ning arhitektid ei tohiks tunda end ohustatuna uute tarkvaralahenduste poolt, vaid peaksid neid omaks võtma.

2. LÄHTEMATERJALID JA METOODIKA

2.1. Kasutatavad tarkvarad

2.1.1. Toggl Track

Toggl Track [25] on brauseris töötav ajajälgimise tarkvara, mis loodi Alari Aho ja Krister Haavi poolt 2006. aastal. Seda kasutatakse tööülesannetele kuluva aja jälgimiseks, projektidele kulutatud aja analüüsiks ning tootlikkuse hindamiseks.

2.1.2. Rhino3D/Grasshopper

Rhinoceros [26] on ääriselt kasutatav 3D arvutigraafika ja arvutipõhise disaini tarkvara, mille arendajaks on *Robert McNeel & Associates*. Rhinoceroose geomeetria põhineb NURBS matemaatilisel mudelil, mis keskendub matemaatiliselt täpsete kõverjoonte ja vabakujuliste pindade tekitamisele. Programmi esimene versioon töötati välja aastatel 1992 – 1998. Rhinoceroost kasutatakse peamiselt arhitektuuris, tööstuslikus projekteerimises ja toodete modelleerimiseks. Visuaalse programmeerimise pistikprogramm nimega Grasshopper [27] on samuti *Robert McNeel & Associates* poolt arendatud.

Grasshopper on visuaalne programmeerimise keel ja keskkond, mis töötab Rhinoceroose programmi sees. Grasshopper võimaldab luua programme eelprogrammeeritud koodiplokke lõuendile lohistades ning nende väljundeid ja sisendeid omavahel ühendades. Lisaks eelprogrammeeritud koodiplokkidele on võimalik kasutada ka koodiplokki, mis lubab kirjutada Püütoni skripti. Grasshopperi esimene versioon valmis aastal 2007. Grasshopperit peamiselt kasutatakse generatiivsete algoritmide loomiseks kunsti või arhitektuuri tarbeks. Samuti kasutatakse seda ehitusinseneride, arhitektide ning tootjate poolt parameetriliseks modelleerimiseks, valgustuse toimivuse analüüsimiseks ning energiasäästliku ehituse analüüsimiseks.

2.1.3. Tekla Structures

Tekla Structures [28] on hoone informatsiooni modelleerimise (BIM) tarkvara, mida kasutatakse laialdaselt terase ning betooni projekteerimiseks. Tarkvara arendajaks on Tekla Corporation, mis hiljem omandati Trimble Inc. poolt.

2.1.4. Karamba3D

Karamba3D [29] on LEM tarkvara, mis võimaldab sõrestikke, raame ja plaate täpselt analüüsida. Karamba3D töötab Grasshopperi keskkonnas pistikprogrammina ning seeläbi võimaldab kasutada Grasshopperi algoritmilist võimekust parameetriliseks modelleerimiseks. Karamba3D on lihtne kasutada ning on mõeldud arhitektidele ja inseneridele kasutamiseks projekti varajastes staadiumites.

2.1.5. Microsoft Excel

Microsoft Excel [30] on tabelarvutus- ja tabeltöötlusprogramm, mis kuulub kontoritarkvara Microsoft Office koosseisu. Tabelarvutussüsteem võimaldab kasutajal kirjeldada lihtsamaid ja keerukamaid arvutusi, andmeid talletada, säilitada ja taasesitada. Excel loodi 1987. aastal ning on aastate jooksul kujunenud välja üheks laiemalt kasutatavaks tabeltöötlustarkvaraks.

2.1.6. Ftool

Ftool [31] on tasandiliste raamide struktuuranalüüsiks loodud programm. Esialgselt loodud õpetamiseks, leiab ta kasutust ka kommertsvaldkonnas. Käesolevas töös kasutatakse seda arvutuste kontrollimiseks.

2.2. Analüüsi ülesehitus

Analüüsi eesmärgiks on uurida tarkvaralahenduste kasutusele võtmise teostatavust. Selleks mõõdetakse aega, et tuvastada õppimisele ning mudelite loomisele kulutatud aeg ning hinnatakse võimalikku efektiivsuse tõusu.

Analüüsi esimene osa käsitleb parameetrilise geomeetria loomist ning loodud mudeli ühilduvust projekteerimistarkvaraga Tekla Structures. Analüüsi teine osa käsitleb parameetrilise mudeli loomist ja ühendamist arvutustarkvaraga Karamba3D ning ajalist võrdlust alternatiivse arvutusmeetodiga Excelis lahendamise.

2.2.1. Tarkvarade õppimisele kuluv aeg

Tarkvarade õppimisele kuluvat aega mõõdetakse Toggl Track rakendusega ning esitatakse peatükis 3.1.

Eristatakse programmi kasutamisele eelnenud õppeaega, praktilist õppeaega parameetrilise geomeetria mudelit tehes ning parameetrilise arvutusmudeli loomisele eelnenud õppeaega.

Õppeobjektid on:

Enne Rhino3D/Grasshopper kasutamist:

- Rhino3D/Grasshopper õppevideode vaatamine
- Püütoni programmeerimiskeele videoloengute vaatamine

Parameetrilise geomeetria mudeli loomisel:

- Grasshopperi kasutamine demo näitel õppimisel
- Grasshopperi kasutamine iseseisvalt geomeetria loomiseks
- Grasshopperis Püütoni skripti kirjutamine geomeetria loomiseks

Enne parameetrilise arvutusmudeli analüüsi teostamist:

- Karamba3D juhendi lugemine
- Karamba3D näitefaili õppimine

2.3. Parameetrilise geomeetria mudel ja ühilduvus

2.3.1. Eesmärk ja ülesehitus

Antud analüüsi osas uuritakse parameetrilise geomeetria loomise võimalusi Grasshopperis ning eksporditakse saadud parameetriline mudel Teklasse, kus on võimalik seda potentsiaalselt edasi projekteerida. Sellele kulunud aega mõõdetakse töömeetodi teostatavuse hindamiseks.

Geomeetria loomiseks on mitmeid viise erinevate eeliste ja puudustega. Sobiv geomeetria loomise viis valitakse vastavalt kasutatavatele parameetritele ning geomeetria esitatud nõudmistele.

Esmalt uuritakse Grasshopper-Tekla Live Link demo video põhjal parameetrilise hoone karkassi loomist ning seejärel luuakse geomeetria iseseisvalt.

2.3.2. Parameetrilise geomeetria loomise lähteülesanne

Luu geomeetria tootmishoonele, mis koosneb kahest osast: kõrge laega tootmisplokk ning kahekorruseline olmeplokk. Hoone osasid peab olema võimalik erinevalt muuta silde, raami sammu ja korruse kõrguse poolest. Olmeploki esimene korrus on erineva kõrgusega kui järgnevad korrused.

2.3.3. Geomeetria loomise metoodika

Tekla Structures kodulehel on õppevideo parameetrilise mudeli Grasshopperist Tekla Structures keskkonda eksportimiseks [32]. Seda demonstreeriti nende poolt loodud parameetrilise mudeli peal ning see valitakse näitematerjaliks, mille järgi esmalt hoone geomeetria teha.

Näites on lähteparameetrite järgi loodud punktide võrgustik, mille vahele on loodud postid ja talad. Õigete punktide vahele joonte tegemiseks on lisatud mitmeid listide töötlemise funktsioone. Seejärel teisendatakse jooned Tekla elementideks, mis koheselt eksporditakse ka Tekla Structures tarkvarasse.

Esimese katsetusena kasutatakse õppevideos nähtud funktsioone lähteülesandele vastava geomeetria loomiseks.

Teise katsetusena kasutatakse ka teisi Grasshopperi poolt pakutavaid funktsioone lähteülesande geomeetria loomiseks.

Kolmanda katsetusena kulutati aega Püütoni skripti kirjutamisele hoone geomeetria loomiseks. Lihtsate funktsioonide abil loodi punktid ning nende vahelised jooned hoone joongeomeetria tekitamiseks.

Valmis mudelit täiendatakse otsaseintesse vahepostide lisamise võimalusega.

2.4. Parameetrilise arvutusmudeli ajaline võrdlus käsitsiarvutusega

2.4.1. Ülesehitus ja eesmärk

Selles analüüsi osas võrreldakse kahte alternatiivset konstruktsiooni arvutuse meetodit: parameetrilise mudeli külge ühendatud arvutustarkvara abil ning käsitsiarvutus kasutades jõumeetodit.

Esmalt viiakse konstruktsiooni arvutus läbi parameetrilise mudeliga arvutustarkvara abil ning seejärel jõumeetodi abil tehtud arvutustega.

Analüüsi eesmärgiks on hinnata parameetrilise mudeli abil tehtava konstruktsiooni arvutuse peale kuluvat aega võrreldes arvutusmeetodiga, mis on saadaval kõikidele inseneridele ilma lisaväljaõppeta. Hinnatakse ettevalmistustele kuluvat aega, arvutusalgoritmidele kuluvat aega ning mudeli lähteandmete muutmisel tulemuste saamiseks kuluvat aega. Lisaks sellele antakse arvamusi arvutusmeetodite efektiivsuse kohta ning tarkvara arvutustulemuste kasutamise võimaluste kohta.

2.4.2. Ettevalmistus

Parameetrilise arvutusmudeli loomise ettevalmistuseks on peatükis 2.2.1. käsitletud tarkvara õppimisele ning geomeetrilise mudeli peale kulutatud aeg.

Ehitismehaanika valemite abil läbi viidavad arvutused on õpitud eriala omandamise käigus kohustuslikke aineid läbides ning lõputöö tegemisel ettevalmistuseks aega ei kulutatud.

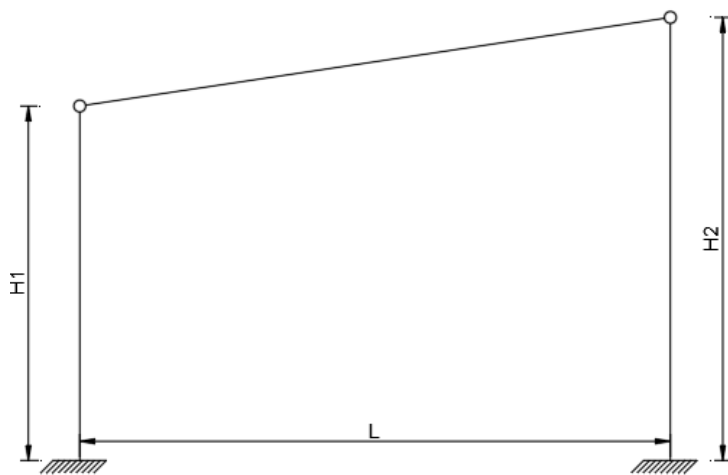
Ajaarvutustes ei arvestata arvutuste ja jooniste vormistamisele kulunud aega.

2.4.3. Lähteülesanne

Projekteerida teraskarkass ühekaldelise katusega hallile.

Arvutada koormused, sisejõud, dimensioneerida ristlõiked ja arvutada tala läbipaine.

Hoone pikkus 30 m, laius 10 m, kõrgused $H_1 = 6$ m ja $H_2 = 7,5$ m. Posti samm 6 m. Hoone asub Tartumaal avatud põllul (maastikutüüp I). Lihtsustuseks ei ole vaja katusekihtide omakaaluga arvestada. Katusetaladel on kiive takistatud.



Joonis 13. Hoone raam.

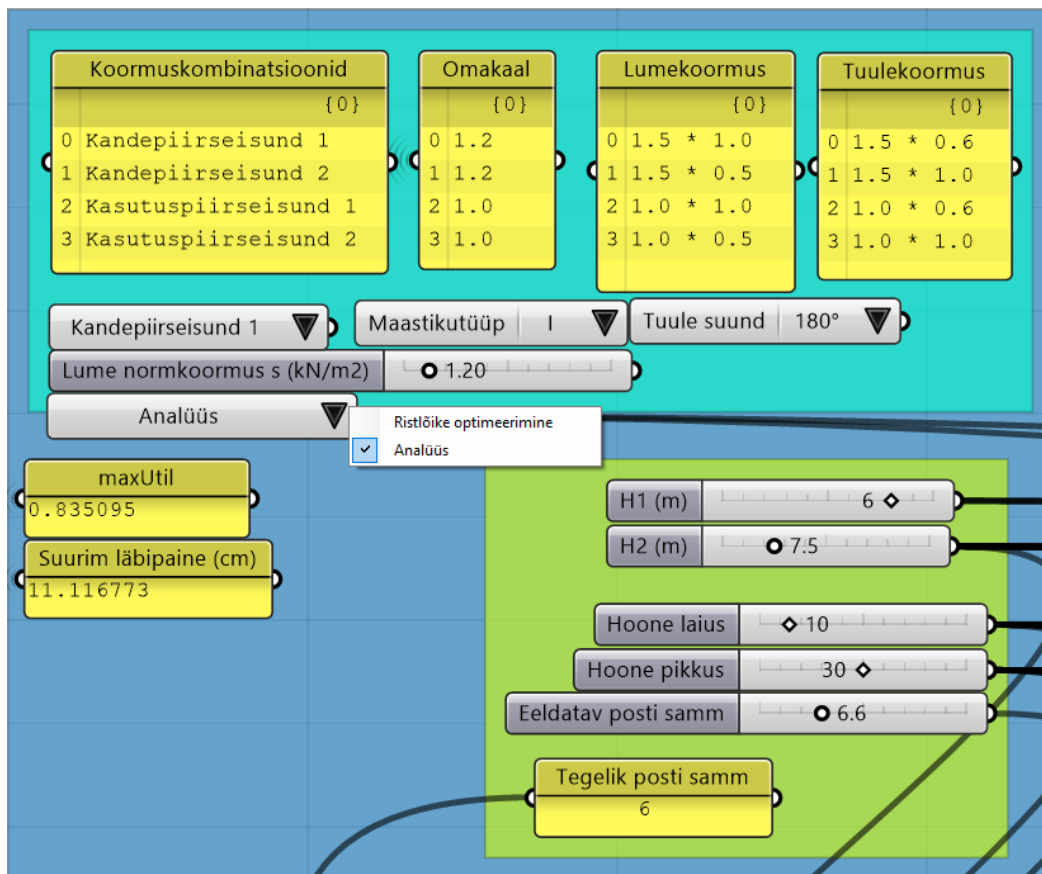


Joonis 14. Hoone pealtvaade.

2.4.4. Parameetriline arvutusmudel

Parameetriline arvutusmudel loodi tarkvaras Rhinoceros3D ja Grasshopper. Arvutuste tegemiseks kasutati Grasshopperi keskkonnas töötavat pistikprogrammi Karamba3D [33].

Muudetavad parameetrid määratakse enne mudeli geomeetria loomist. Parameetrite arvu ja tüübi alusel otsustatakse geomeetria loomise viis. Rohkemate parameetrite kasutamine tingib keerulisema ja aega nõudvama geomeetria loomise protsessi, seetõttu määratakse ainult olulised parameetrid. (Joonis 15) on näha peamised muudetavad parameetrid ning nende muutmise juures oluline informatsioon.



Joonis 15. Grasshopperi mudeli parameetrid.

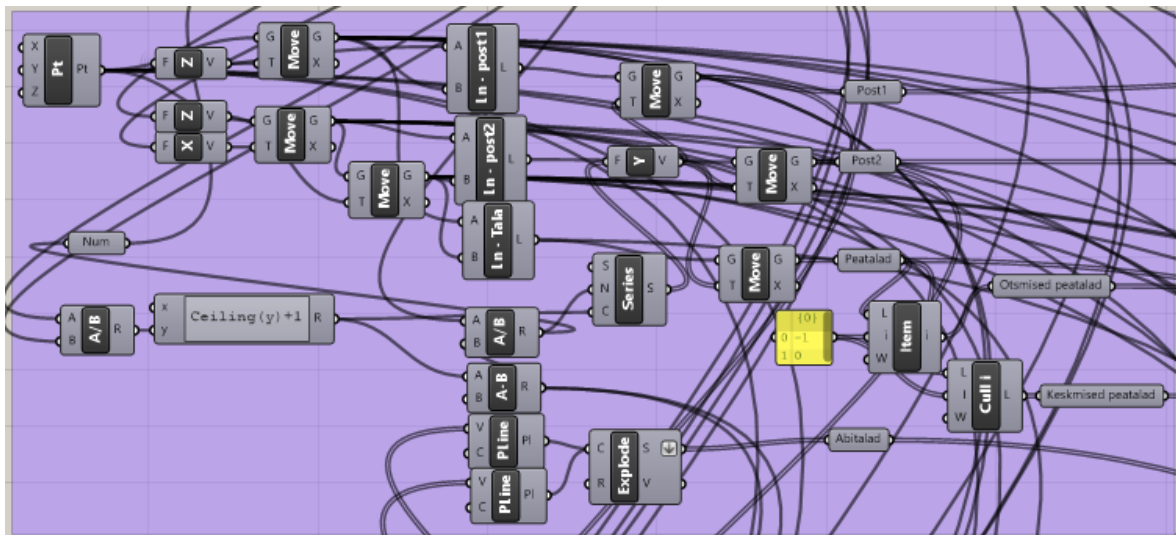
Antud mudelis määrati esmalt parameetriteks hoone põhilised geomeetrilised karakteristikud: hoone laius, hoone pikkus, eeldatav posti samm, madalama seina kõrgus H1 ning kõrgema seina kõrgus H2. Peale geomeetria loomist lisati arvutuste jaoks olulised parameetrid: koormuskombinatsioon, maastikutüüp, tuule suund, lume normkoormus. Valikus on ka kaks analüüsitüüpi: 1) *Ristlõike optimeerimine* viib läbi analüüsi ning automaatselt kohandab elementide ristlõikeid optimaalsemaiks ning 2) *Analüüs* arvutab mudelit vastavalt ette antud ristlõigetele.

Eeldatav posti samm lubab kasutajal määrata ligikaudse posti sammu, mille alusel programm paneb paika lähima sobiva raamide arvu ning tagastab sellest tuleneva täpse posti sammu. Kollased kastid (Joonis 15) on tekstikastid, mida saab kasutada andmete käsitsi sisestamiseks kas märkusteks või komponendi sisendi määramiseks, ühendades tekstikasti komponendi väljundiga kuvab ta väljundinfo tekstikujul. Ülemine rida kollaseid kaste on märkused, mis annavad kasutajale infot koormuskombinatsioonide kohta. Alumised kollased kastid on ühendatud vastavate komponentide väljunditega, et anda kasutajale olulist infot parameetrite muutmise käigus. *MaxUtil* tagastab kandevoime

kasutamise määra (enimkoormatud element kasutab ära 0.835 oma kandevõimest – 1.0 on 100%), *suurim läbipaine* tagastab suurima deformatsiooni konstruktsioonis ning *tegelik postisamm* tagastab raamide omavahelise kauguse.

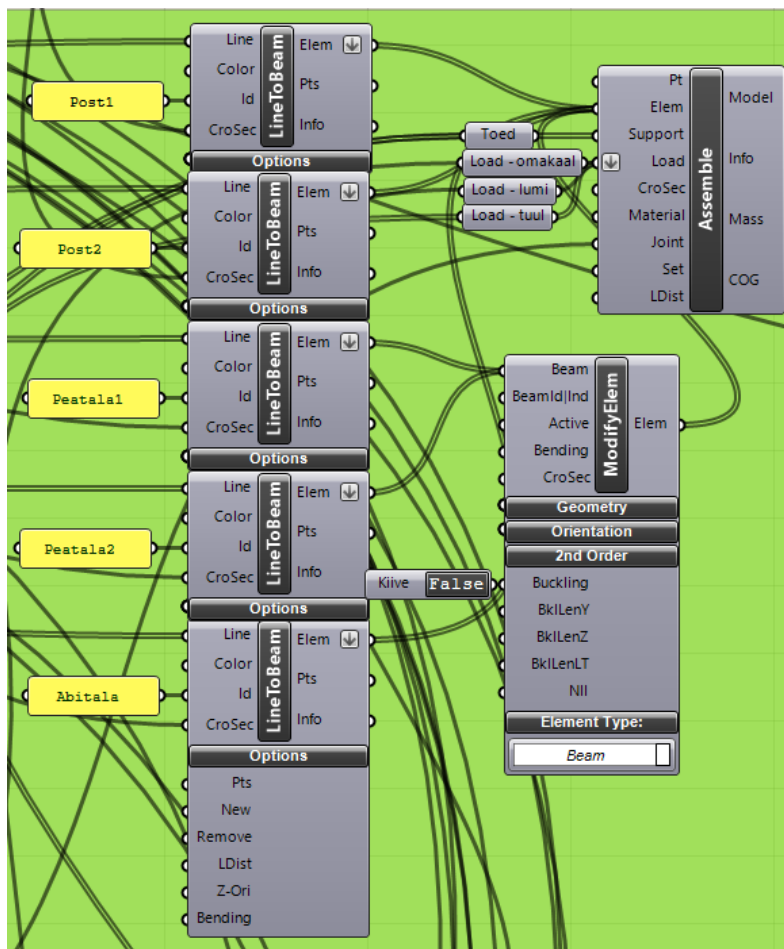
Geomeetria loomisel määratakse punktidega ära olulisemad otsapunktid ning luuakse nende vahele joongeomeetria (Joonis 16). Korduvat joongeomeetriat kopeeritakse vastavalt lähteandmetele. Joongeomeetriad grupeeritakse järgnevalt:

- Post1 – madalama hoone külje postid
- Post2 – kõrgema hoone külje postid
- Otsmised peatalad – otsaraamide kandvad talad
- Keskmise peatalad – keskmiste raamide kandvad talad
- Abitalad – raame ühendavad abitalad



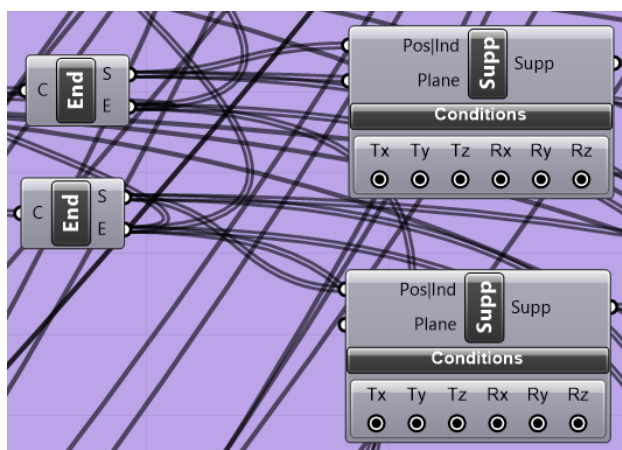
Joonis 16. Mudeli joongeomeetria loomine Grasshopperis.

Lihtsa joongeomeetria mudeliks teisendamiseks on Karamba3D pistikprogrammis komponent *LineToBeam*, mis muudab jooned elementideks ja komponent *Assemble Model*, mis elemendid koondab terviklikuks mudeliks (Joonis 17). Elementidele saab määrata ristlõike ning ka identifitseerivaid tunnuseid. Mudeli koostamisel tuleb lisada koormused, toe tingimused ning elementide kinnitustingimused, milleks vaikumisi on jäik ühendus.

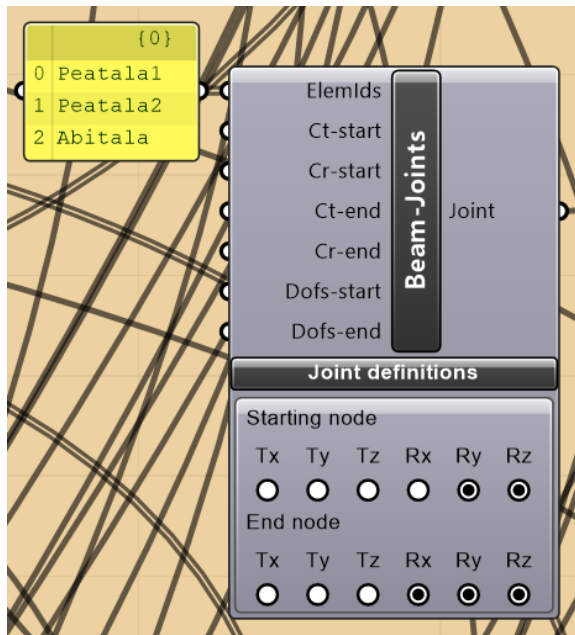


Joonis 17. Geomeetriliste joonte elementideks teisendamine.

Vastavalt lähteülesandele määratakse mudelile jäik toeühendus (Joonis 18) ning muude elementide vahelised kinnitused liigenditega (Joonis 19).



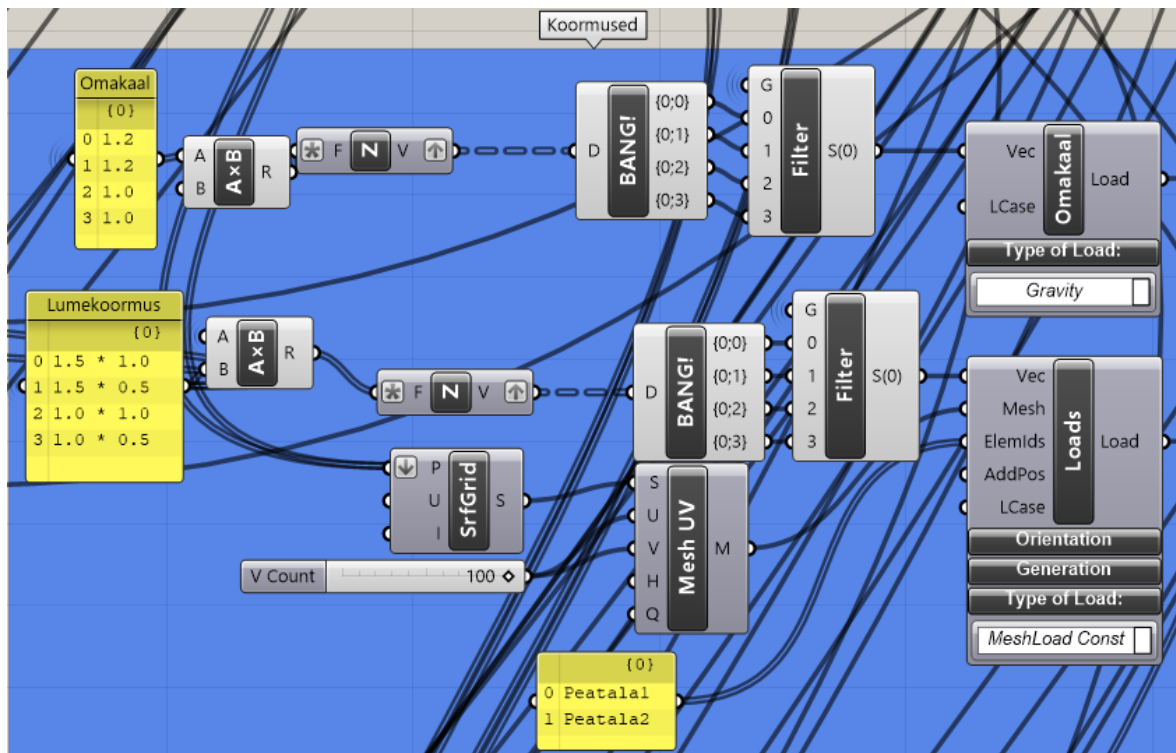
Joonis 18. Toetingimuste määramine.



Joonis 19. Valitud elementidele kinnitustingimuste määramine.

Mudelile määrati kolme tüüpi koormusi: 1) elementide omakaal, mille programm arvutab ise; 2) lumekoormus, mis määrati katusele pinnakoormusena ning on üks kasutaja poolt muudetavatest parameetritest; 3) tuulekoormus, määrati pinnakoormusena tsoonide kaupa hoone seintele ja katusele vastavalt Ehituskonstruktori käsiraamatus käsitletud meetodile [34].

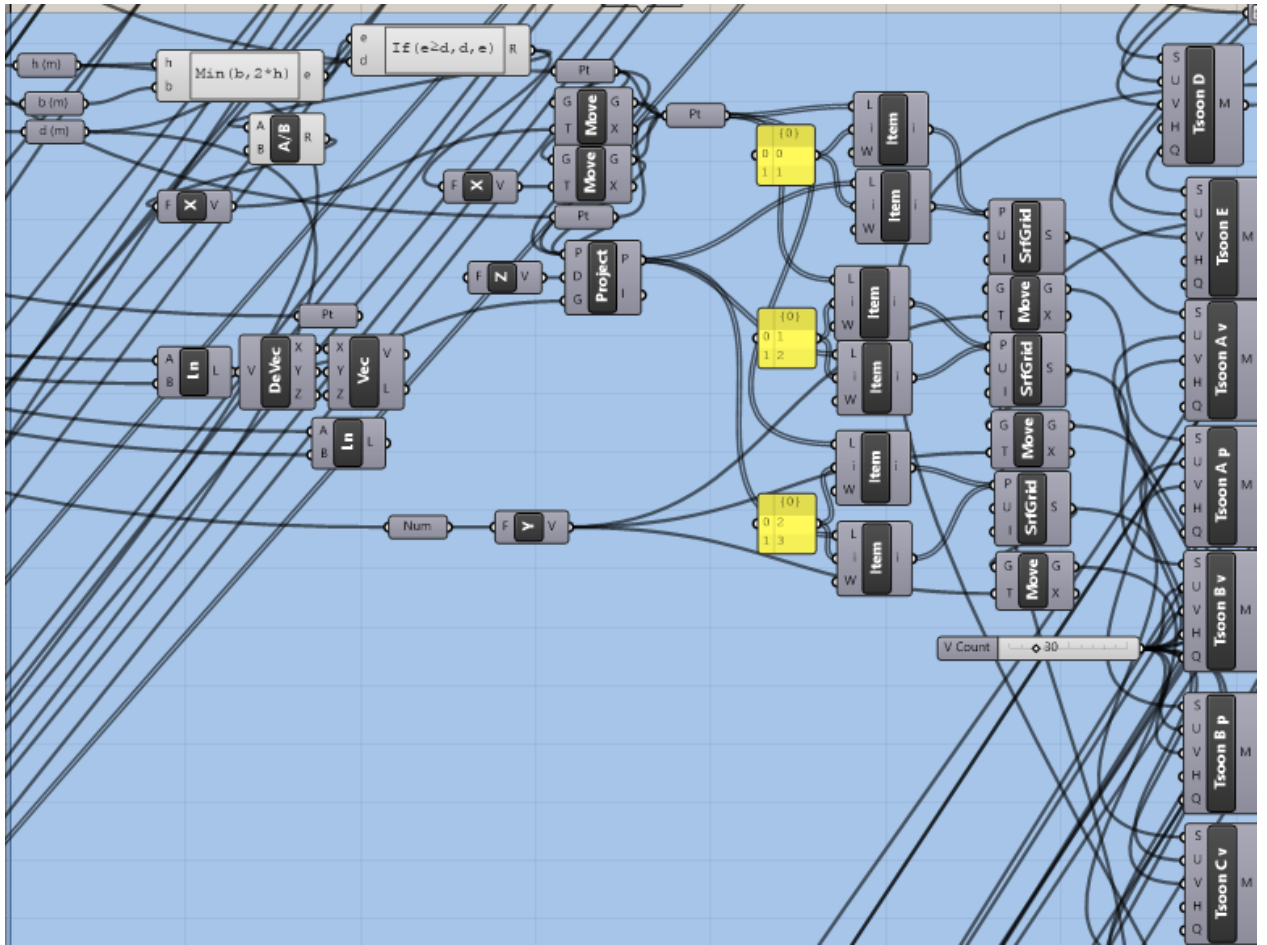
Omakaalu koormuse arvutamiseks tuleb lisada vastav komponent ning osavaruteguri lisamiseks tuleb anda sisendile V_{ec} sobiv väärtus (Joonis 20). Vaikimisi on väärtuseks z-suunaline vektor väärtusega [-1]. Lumekoormuse lisamine vajab geomeetrilise pinna loomist, millele koormus rakendatakse ning osavarutegureid. Lumekoormuse juures sai täpsustatud ka koormatud elemendid identifikaatorite abil. See oli vajalik, et tagada raame ühendavate abitalade töötamise jäigastavate elementidena, mitte vertikaalkoormust vastu võtva konstruktsiooni-osadena.



Joonis 20. Omakaalukoormuse ja lumekoormuse lisamine mudelile.

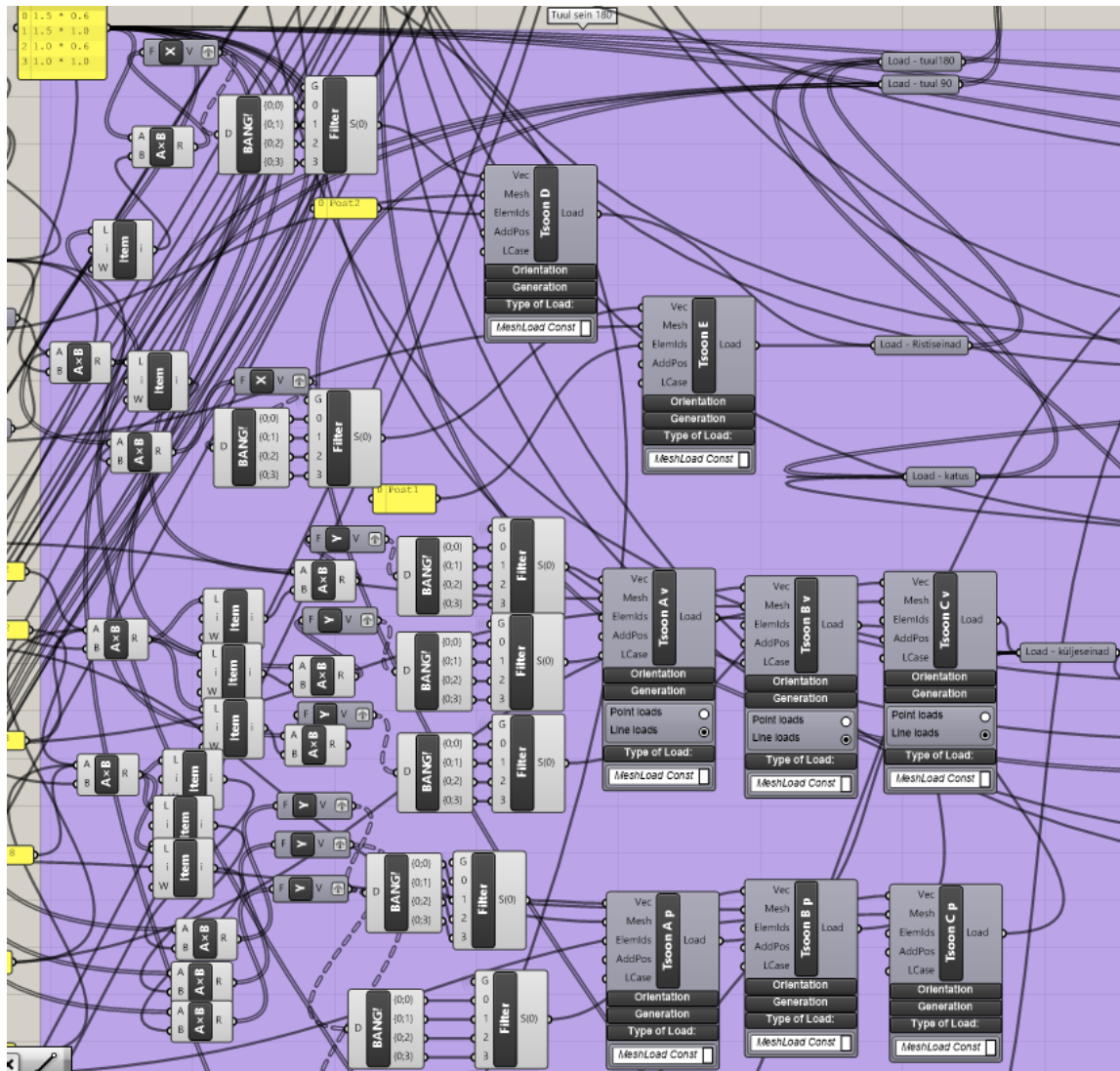
Tuulekoormus loodi kahe suuna jaoks: 180° ja 90° , analüüsi tulemused antakse tuulesuuna 180° jaoks. Tuulekoormused määratakse seinte tsoonidele A, B, C, D ja E ning katuse tsoonidele F, G, H ja I (Joonis 21).

Tsoonide loomise käigus on vaja määrata h , b ja d väärtused ning arvutada e väärtus. Seejärel tuleb siduda tsoonide mõõtmed hoone geometriaga, et õiged tsoonid oleks arvutatud ka hoone parameetrite muutumisel.



Joonis 21. Hoone püstseinte koormustsoonide loomine.

Edasi on vaja määrata tsoonide rõhutegurid vastavalt teguri h/d väärtusele, korrutada see läbi kiirusrõhuga $q_p(z_e)$ ning siduda see koos tsoonide geomeetriaga koormusekomponendis (Joonis 22).



Joonis 22. Tuulekoormuse komponendi loomine.

Seejärel peaks olema olemas kõik vajalikud osad konstruktsiooni arvutamiseks. Arvutusanalüüsi läbiviimine on ettenähtud kahes osas. Kõigepealt kasutatakse ristlõigete optimeerimise komponenti *OptiCroSec*, mis leiab optimaalsed ristlõiked vastavalt valitud parameetritele ja koormuskombinatsioonile. Seejärel vastavalt saadud tulemustele valitakse ristlõiked ning teostatakse analüüs *Analyze* komponendi abil ning kontrollitakse kandevõime ja läbipainete vastavust lubatud piiridele. Ehituskonstruktori käsiraamatu tabeli 12.13 [34] järgi on üldjuhul katusetalade piirläbipaine $L/200$, mis antud lähteülesande korral on $10000/200 = 50$ mm.

Käesolevas töös kasutatakse ainult mõndasid Karamba3D pakutavaid komponente vajalike tulemuste saamiseks. Võimalik on veel konstruktsioone optimeerida eemaldades vähem koormatud elemendid, analüüsida mittelinearseid mudeleid, arvutada normaalvõnkumist

jm. Loetletud teemade käsitlemine käesolevas lõputöös oleks muutnud töö liiga mahukaks ning seetõttu neid põhjalikumalt ei uuritud.

2.4.5. Arvutused kasutades ehitusmehaanikat

Selles peatükis tehtud arvutustes on lähtutud järgmistest raamatutest: „Ehituskonstruktori käsiraamat“ [34], „Ehitusmehaanika. Varraskonstruksioonide staatika“ [35]. Arvutused on realiseeritud „Excel’i“ keskkonnas.

Tagamaks parema võrdluse arvutusmetoodikate vahel koostati ka käsitsiarvutuste valemid parameetriselt. Excel võimaldab valemites kasutada arvude asemel lahtreid ning selle abil saab arvutused muuta sõltuvaks valitud hulgast algandmetest. Muudetavad parameetrid on näidatud (Joonis 23).

LÄHTEANDMED		
Maastikutüüp	1	
Hoone kõrgus H1	6 m	
Hoone kõrgus H2	7.5 m	
Hoone laius l	10 m	
Hoone pikkus	30 m	
Posti samm	6 m	
Koormuskombinatsioon	Kandepiirseisund 1	
sk=	1.5 kN/m ²	

Joonis 23. Lähteandmed Excelis.

Lumekoormus määratakse kasutades valemit:

$$s = s_k * \mu_l , \quad (2.1)$$

kus s – lumekoormuse normsuurus $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$;

s_k – lume normkoormus maapinnal $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$;

μ_l – lumekoormuse kujutegur.

Kandepiirseisundi koormuskombinatsioonid koostati alalise arvutusolukorra jaoks:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \sum_{l \geq 1} \gamma_{Q,l} Q_{k,l} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} , \quad (2.2)$$

kus „+“ ja Σ tähistavad mõjumist samaaegselt ühes kombinatsioonis;

G – alaline ehk püsikoormus;

P – eelpingekoormus;

γ - koormuse osavarutegur vastavalt indeksile;

$Q_{k,1}$ – domineeriv muutuvkoormus;

$Q_{k,i}$ – muu muutuvkoormus;

ψ – kombinatsioonitegur.

Kasutuspiirseisundi koormuskombinatsioonid koostati normkombinatsiooni jaoks:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{l \geq 1} Q_{k,l} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} . \quad (2.3)$$

Excelis koostati arvutused vaid 180° tuule suuna jaoks, kuna 90° suuna jaoks oleks vaja uut arvutusskeemi ja arvutuste maht kahekordistuks.

Geomeetria ja kinnitustingimused on väljendatud arvutustes, mis tehti lähteülesande geomeetrilise kuju järgi. Parameetrite muutmisel on eeldatud, et hoone üldine geomeetiline kuju jääb selliseks nagu lähteülesandes ette antud (Joonis 13).

Tuulekoormus arvutati sama arvutusmetoodika järgi kui analüüsi esimeses osas vastavalt ehituskonstruktori käsiraamatule ning koostati Excelis sõltuvatena alparameetritest.

Tuulerõhk arvutatakse valemiga:

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe} , \quad (2.4)$$

kus w_e – konstruktsiooni välispinnale mõjuv tuulerõhk $\frac{N}{m^2}$;

$q_p(z_e)$ – tuule kiirusrõhk $\frac{N}{m^2}$;

z_e – arvutuskõrgus m;

c_{pe} – välisrõhutegur.

Tuule kiirusrõhk leitakse vastavalt maastikutüübile valemiga:

$$\begin{array}{lll} \text{Maastikutüüp } 0 & z_{\min} = 1 \text{ m} & q_p = 6.72 \ln^2 \frac{z}{0.003} + 47.02 \ln \frac{z}{0.003} \\ \text{Maastikutüüp } I & z_{\min} = 1 \text{ m} & q_p = 7.96 \ln^2 \frac{z}{0.01} + 55.70 \ln \frac{z}{0.01} \\ \text{Maastikutüüp } II & z_{\min} = 2 \text{ m} & q_p = 9.96 \ln^2 \frac{z}{0.05} + 69.75 \ln \frac{z}{0.05} \\ \text{Maastikutüüp } III & z_{\min} = 5 \text{ m} & q_p = 12.81 \ln^2 \frac{z}{0.3} + 89.64 \ln \frac{z}{0.3} \\ \text{Maastikutüüp } IV & z_{\min} = 10 \text{ m} & q_p = 15.15 \ln^2 z + 106.06 \ln z \end{array} \quad . \quad (2.5)$$

Tuulerõhutegurid leitakse vastavalt Ehituskonstruktori käsiraamatu tabelitele 8.19 ja 8.21 [34] (Joonis 24).

Omakaalukoormus arvutati vastavalt esialgsele valitud ristlõikele ning lumekoormus vastavalt lähteandmetes määratud parameetritele. Koormus teisendati keskmise ja otsmise tasapinnalise raami jaoks algparameetritest sõltuvate geomeetriliste arvutuste abil (Joonis 25). Järgmisena teisendati joonkoormused raami arvutusskeemi jaoks (Joonis 26).

Tuulekoormus seinale				20	Tuulekoormus otsaraamile		
				21	$q_{D,wind180}$	1.65	kN/m
	180°			22	$q_{E,wind180}$	-0.93	kN/m
e=	15 m			23	Tuulekoormus keskmisele raamile		
h/d=	0.75			24	$q_{D,wind180}$	3.30	kN/m
				25	$q_{E,wind180}$	-1.87	kN/m
Tsoon	cpe	we [kN/m ²]	A [m ²]	26	Tuulekoormus katusele		
A	-1.20	-0.861	21.8	27	Otsaraamile		
B	-0.80	-0.574	45.7	28	$q_{F,wind180}$	-5.10	kN/m
C	-0.50	-0.359	0.0	29	$q_{H,wind180}$	-1.80	kN/m
D	0.77	0.550	225.0	30	Keskmisele raamile		
E	-0.43	-0.311	180.0	31	$q_{G,wind180}$	-5.60	kN/m
				32	$q_{H,wind180}$	-3.60	kN/m
				33			
Tuulekoormus ühekaldelisele katusele				34	Lumekoormus		
	180°			35	Otsaraamile	3.6	kN/m
				36	Keskmisele raamile	7.2	kN/m
	cpe	we [kN/m ²]	A [m ²]	37			
F ₁	-2.37	-1.70	5.63	38	Tala ristlõige	HEA 100	
F ₂	-2.37	-1.70	5.63	39	Ristlõike parameetrid		
G	-1.30	-0.93	33.75				
H	-0.84	-0.60	255.00				
I	-	-	-				

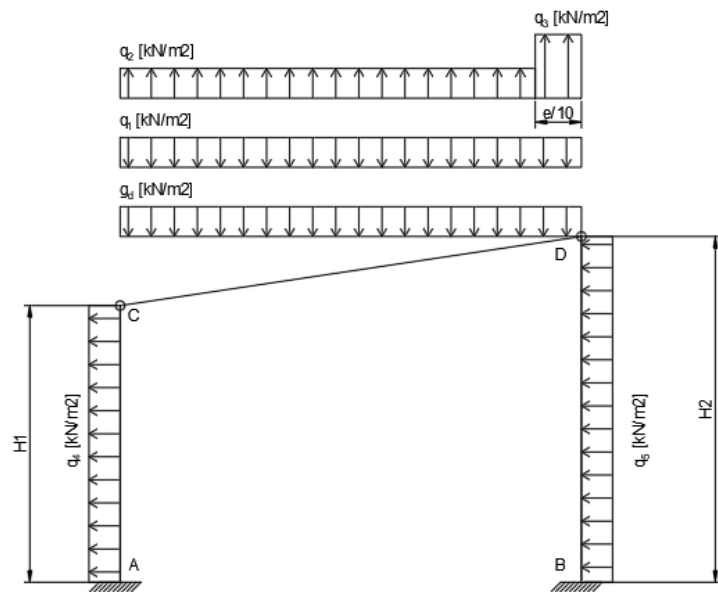
Joonis 24. Tuulerõhutegurid Excelis.

Joonis 25. Raamile mõjuvad joonkoormused Excelis.

42	Arvutusparameetrid keskmine raam							Arvutusparameetrid otsmine raam		
43	g_d =	0.61	kN/m					g_d =	0.43	kN/m
44	q_1 =	10.80	kN/m					q_1 =	5.40	kN/m
45	q_2 =	-3.24	kN/m					q_2 =	-1.62	kN/m
46	q_3 =	-5.04	kN/m					q_3 =	-4.59	kN/m
47	q_4 =	1.68	kN/m					q_4 =	0.84	kN/m
48	q_5 =	2.97	kN/m					q_5 =	1.49	kN/m

Joonis 26. Arvutusskeemi koormused Excelis.

Arvutuste teostamiseks koostatakse raami arvutusskeem koos sellele mõjuvate koormustega (Joonis 27).



Joonis 27. Raami arvutusskeem.

Arvutused teostatakse tasapinnalise raami jaoks jõumeetodit kasutades. Esmalt leitakse raami staatikaga määramatuse aste:

$$n = 2l + t - 3k, \quad (2.6)$$

kus

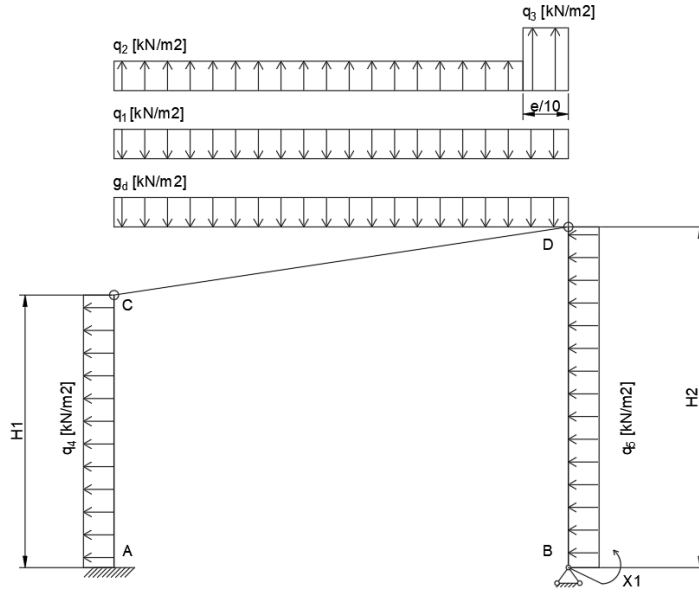
n – staatikaga määramatuse aste;

l – lihtliigendite arv, toeliigendeid ei arvestata;

t – toesidemete arv;

k – geomeetriliselt muutumatute elementide arv.

Seejärel valitakse sobiv põhiskeem (Joonis 28), eemaldades liigsed sidemed ning asendades nende mõju tundmatute reaktsioonidega X.



Joonis 28. Raami põhiskeem.

Kuna valemite kasutamisel on vaja teada varraste jäikust, valitakse postide ja riivide esialgsed ristlõiked lähtudes paindetugevusest. Esialgne paindetugevus arvutatakse käsitledes riive ja poste lihttaladena. Esialgsete paindemomentide leidmiseks arvutatakse välja toereaktsioonid põhiskeemi järgi:

$$H_B = \frac{q_5 * H_2}{2} , \quad (2.7)$$

$$H_A = q_4 * H_1 + q_5 * H_2 - H_B , \quad (2.8)$$

$$M_C = -\frac{(g_d + q_1) * l^2}{2} + \frac{q_2 * (l - \frac{e}{10})^2}{2} + q_3 * \frac{e}{10} * (l - \frac{e}{20}) - \frac{q_5 * (2H_1 - H_2) * H_2}{2} + H_B * H_1 + V_B * l \quad (2.9)$$

$$V_B = \frac{\frac{(g_d + q_1) * l^2}{2} - \frac{q_2 * (l - \frac{e}{10})^2}{2} - q_3 * \frac{e}{10} * (l - \frac{e}{20}) + \frac{q_5 * (2H_1 - H_2) * H_2}{2} - H_B * H_1}{l} , \quad (2.10)$$

kus e on tuule koormustsoonide määramisel kasutatav suurus m.

$$M_C = M_A + H_A * H_l - \frac{q_4 * H_l^2}{2} = 0 , \quad (2.11)$$

$$M_A = \frac{q_4 * H_l^2}{2} - H_A * H_l , \quad (2.12)$$

$$M_B = M_A + \frac{(g_d + q_l) * l^2}{2} - \frac{q_2 * (l - \frac{e}{10}) (l + \frac{e}{10})}{2} - \frac{q_3 * (\frac{e}{10})^2}{2} + \frac{q_4 * H_l^2}{2} + \frac{q_5 * H_2^2}{2} - V_A * l , \quad (2.13)$$

$$V_A = \frac{M_A + \frac{(g_d + q_l) * l^2}{2} - \frac{q_2 * (l - \frac{e}{10}) (l + \frac{e}{10})}{2} - \frac{q_3 * (\frac{e}{10})^2}{2} + \frac{q_4 * H_l^2}{2} + \frac{q_5 * H_2^2}{2}}{l} , \quad (2.14)$$

Põhiskeemi järgi leitakse suurimad paindemomendid:

$$M_{post} = M_A , \quad (2.15)$$

$$M_{riiv} = \frac{V_A * l}{2} - \frac{H_A * (H_l + H_2)}{2} - M_A - \frac{(g_d + q_l - q_2) l^2}{8} + \frac{q_4 * H_l * H_2}{2} . \quad (2.16)$$

Paindemomentide järgi arvutatakse postidele ja taladele vajalikud vastupanumomendid:

$$\text{Lubatud pinge } \sigma_{adm} = f_y = 235 \frac{N}{mm^2} ,$$

$$\text{kus } \sigma_{adm} - \text{lubatud pinge } \frac{N}{m^2} ;$$

$$f_y - \text{terase norm-voolavuspiir } \frac{N}{m^2} .$$

$$\sigma_{adm} = \frac{M}{W_y} , \quad (2.17)$$

kus M – maksimaalne paindemoment Nm;

W_y – ristlõike elastne vastupanumoment m³;

$$W_y = \frac{M}{\sigma_{adm}}. \quad (2.18)$$

Inertsimomentide järgi leitakse suhtelised jäikused:

$$EI_{post} = EI; EI_{riiv} = \frac{EI_{riiv}}{EI_{post}} * EI, \quad (2.19)$$

kus E – terase elastsusmoodul Pa; $E = 210\,000$ MPa;

I – ristlõike inertsimoment koormuste suunale vastava telje järgi m^4 ;

Et muuta antud skeem ja põhiskeem kinemaatilisel samaväärseks koostatakse siirete sobivuse võrrandid:

$$\delta_{II} X_I + \Delta_{IF} = 0, \quad (2.20)$$

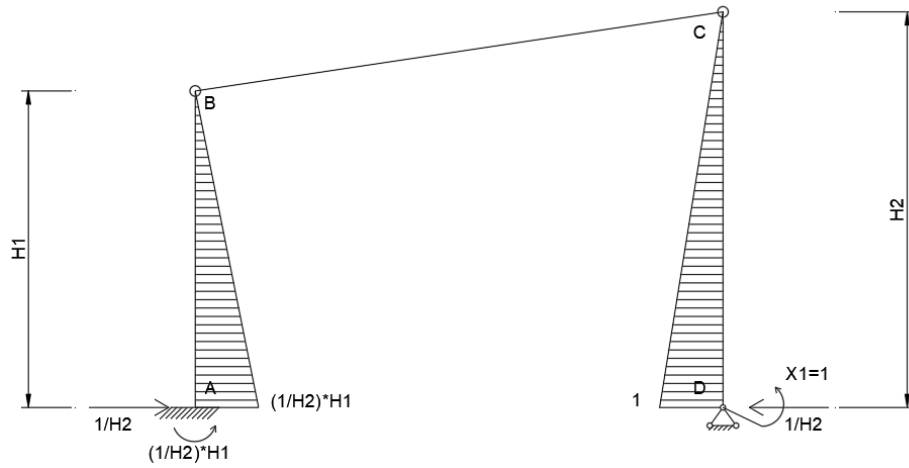
kus δ_{II} , Δ_{IF} on põhiskeemi siirded, mis on põhjustatud vastavalt lisatundmatu $X_I=1$ koormusest.

Arvutatakse teguri väärtus vastavalt ühikepüürile m_1 (Joonis 29):

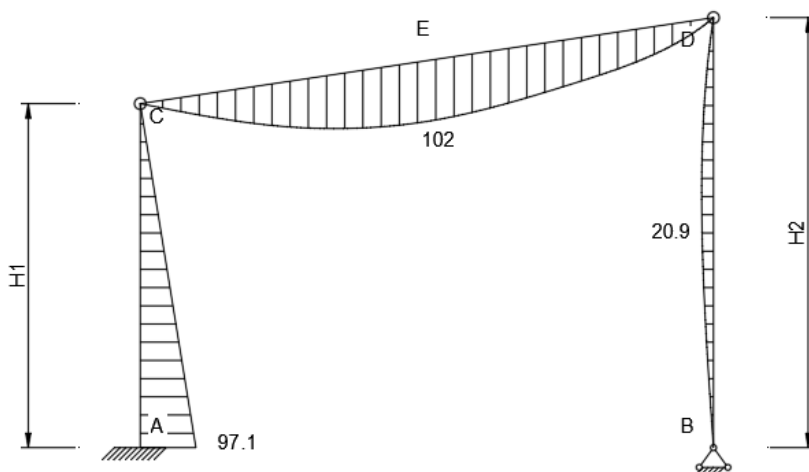
$$\delta_{II} = \frac{1}{EI} * \left(1 * \frac{H_2}{2} * \frac{2}{3} + \frac{H_1}{H_2} * \frac{H_1}{2} * \frac{2 * H_1}{3 * H_2} \right). \quad (2.21)$$

Arvutatakse vabaliikme väärtus vastavalt ühikepüürile m_1 ja epüürile M_0 (Joonis 30):

$$\Delta_{IF} = \frac{1}{EI} * M_A * \frac{H_1}{2} * \frac{2}{3}. \quad (2.22)$$



Joonis 29. Ühikepüür m_1 .



Joonis 30. Epüür M_0 .

Lahendatakse võrrand ning leitakse tundmatu X_1 väärtus:

$$X_1 = -\frac{\Delta_{IF}}{\delta_{11}}. \quad (2.23)$$

Seejärel arvutatakse paindemomendid vastavalt valemile:

$$M_k = M_0 + m_1 X_1. \quad (2.24)$$

Arvutatakse põikjõud vastavalt valemile:

$$Q_k = \frac{ql}{2} \pm \frac{M_p - M_v}{l}. \quad (2.25)$$

Pikijõud leitakse geomeetriliselt sõlmede eraldamise meetodiga.

Tulemusi kontrolliti Ftooli abil.

Jõumeetodi abil leitud sisejõudude abil dimensioneeriti elemendid vastavalt suurimale paindemomendile.

$$W_y = \frac{M_{max}}{\sigma_{adm}}. \quad (2.26)$$

Kuna raami tala on lihttala, mille kiive on takistatud, puudub vajadus stabiilsuskontrolli järele. Posti ristlõiget aga kontrolliti nõtkele, tehti painutatud ja surutud varda kandevõimekontroll ning kontrolliti posti põikjõukandevõimet.

Posti nõtkekandevõime arvutatakse valemiga:

$$N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (2.27)$$

kus $N_{b,Rd}$ – varda nõtkekandevõime $\frac{N}{m^2}$;

χ – nõtketegur;

A – varda brutoristlõikepindala m^2 ;

γ_{M1} – osavarutegur varda üldstabiilsuse kontrollil.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad (2.28)$$

kus $\bar{\lambda}$ – varda tingsaledus;

λ – varda saledus.

$$\lambda = \frac{l_{eff}}{i}, \quad (2.29)$$

kus l_{eff} – varda nõtkepikkus m;

i – varda inertsiraadius m.

$$\Phi = 0,5 * [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2], \quad (2.30)$$

kus Φ – abisuurus;

α – tegur, mille väärtus sõltub nõtkekõverast.

$$\chi = \frac{l}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0. \quad (2.31)$$

Painutatud ja surutud varda kandevõime kontroll:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1, \quad (2.32)$$

kus $M_{b,Rd}$ – posti arvutuslik kiivekandevõime Nmm, $M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M0}};$ (2.33)

N_{Ed} – vardale mõjuv arvutuslik pikijõud N;

$M_{y,Ed}$ – vardale mõjuv arvutuslik paindemoment Nmm;

k_{yy} – koosmõjutegur;

χ_{LT} – kiivetegur, mis sõltub varda tingsaledusest, kuna posti puhul on tegu toruprofiiliga võib lihtsustusena võtta $\chi_{LT} = 1,0$.

Standardsetel valtsprofiilidel tuleb kontrollida ristlõike plastset lõikekandevõimet:

$$V_{pl,Rd} = A_v \frac{f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M0}}, \quad (2.34)$$

kus $V_{pl,Rd}$ – ristlõike plastne lõikekandevõime N;

A_v – ristlõike lõikepindala m², nelikanttorudel $A_v = 2ht_w;$ (2.35)

h – ristlõike kõrgus m;

t_w – ristlõike seinapaksus m;

γ_{M0} – terase voolavuspiiri osavarutegur.

Läbipaine arvutatakse lauskoormusega koormatud lihttala läbipaindevalemi järgi:

$$w_{max} = \frac{5qL^4}{384EI} , \quad (2.36)$$

kus w_{max} – konstruktsiooni lõplik läbipaine m;

q – konstruktsioonile mõjuv lauskoormus $\frac{N}{m^2}$;

L – silde pikkus m.

Läbipainet võrreldakse piirläbipaindega, mis vastavalt Ehituskonstruktori käsiraamatu tabelile 12.13 on $L/200$ [34].

2.4.6. Võrdlemise alused

Analüüsi tulemusena võrreldakse arvutusmeetodeid järgnevate tunnuste alusel:

- Ettevalmistustele kuluv aeg,
- Arvutusmodeli koostamisele kuluv aeg,
- Lähteandmete muutmisel tulemuste saamiseks kuluv aeg,
 - Võrdluseks muudetakse lähteülesandes silde väärtuseks 7 m ning H2 kõrguseks 10 m.

Lisaks sellele võrreldakse arvutusmeetodite efektiivsust ja tulemuste kasutamise võimalusi kvalitatiivselt.

3. TÖÖ TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Ettevalmistused

Tarkvarade õppimisele kulutatud aeg on kokku võetud alljärgnevalt (Tabel 1).

Tabel 1. Tarkvara õppimise ajaline ülesehitus

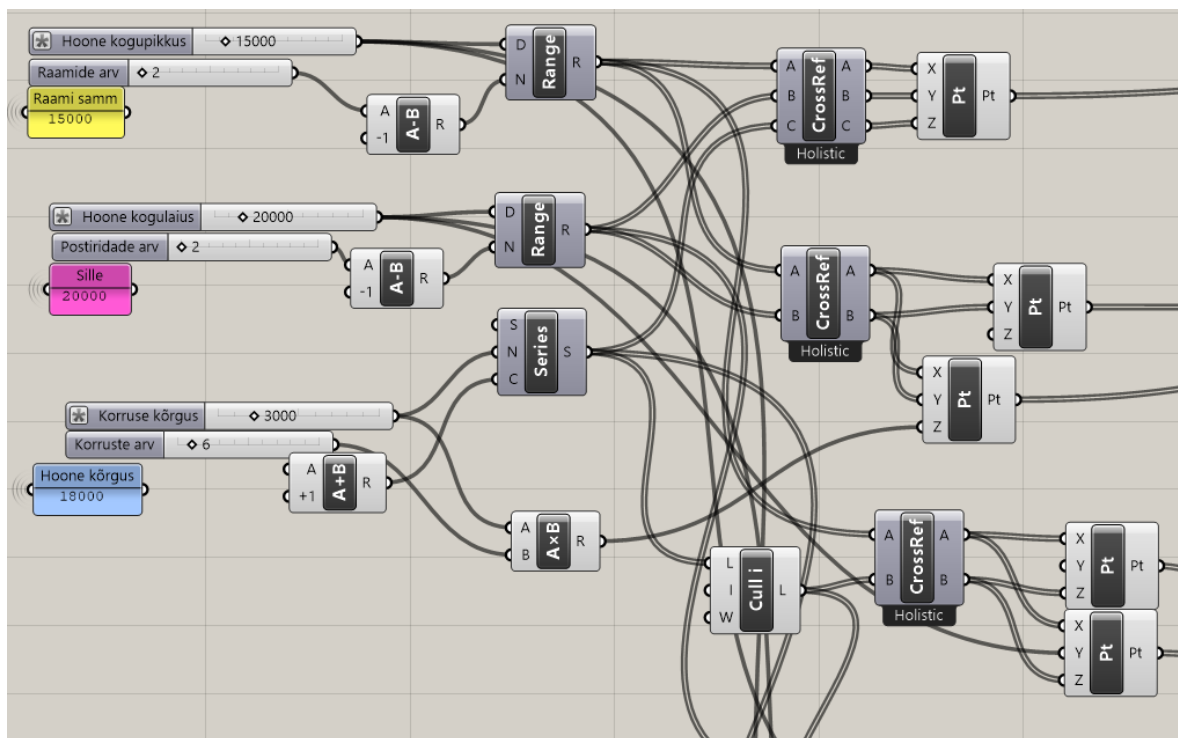
Kirjeldus	Aeg [h:min]	Märkused
Enne tarkvarade kasutamist	10:10	(Summarne aeg)
Rhino3D/Grasshopper õppevideode vaatamine	01:44	Eelnevalt puudus kogemus kummagi tarkvaraga.
Püütoni programmeerimiskeele videoloengute vaatamine	08:26	Eelnevalt puudus kogemus programmeerimisega.
Parameetrilise geomeetria mudeli loomisel	23:18	(Summaarne aeg)
Rhino3D/Grasshopper kasutamine demo näitel geomeetria loomiseks	04:37	Näitefailiks lihtne korrushoone karkass.
Rhino3D/Grasshopper kasutamine iseseisvalt geomeetria loomiseks	08:11	
Püütoni kasutamine geomeetria loomiseks	10:30	Püütoni skript Grasshopperi komponendina.
Enne parameetrilise arvutusmudeli loomist	18:52	(Summaarne aeg)
Karamba3D juhendi lugemine	07:30	
Karamba3D õppevideote	07:55	Erinevate struktuuride koostamine ja

vaatamine		arvutamine Karamba3D abil.
Karamba3D näitefaili õppimine	03:27	Lihtsa tööstushoone arvutusmodeli uurimine.
KOKKU:	52:20	

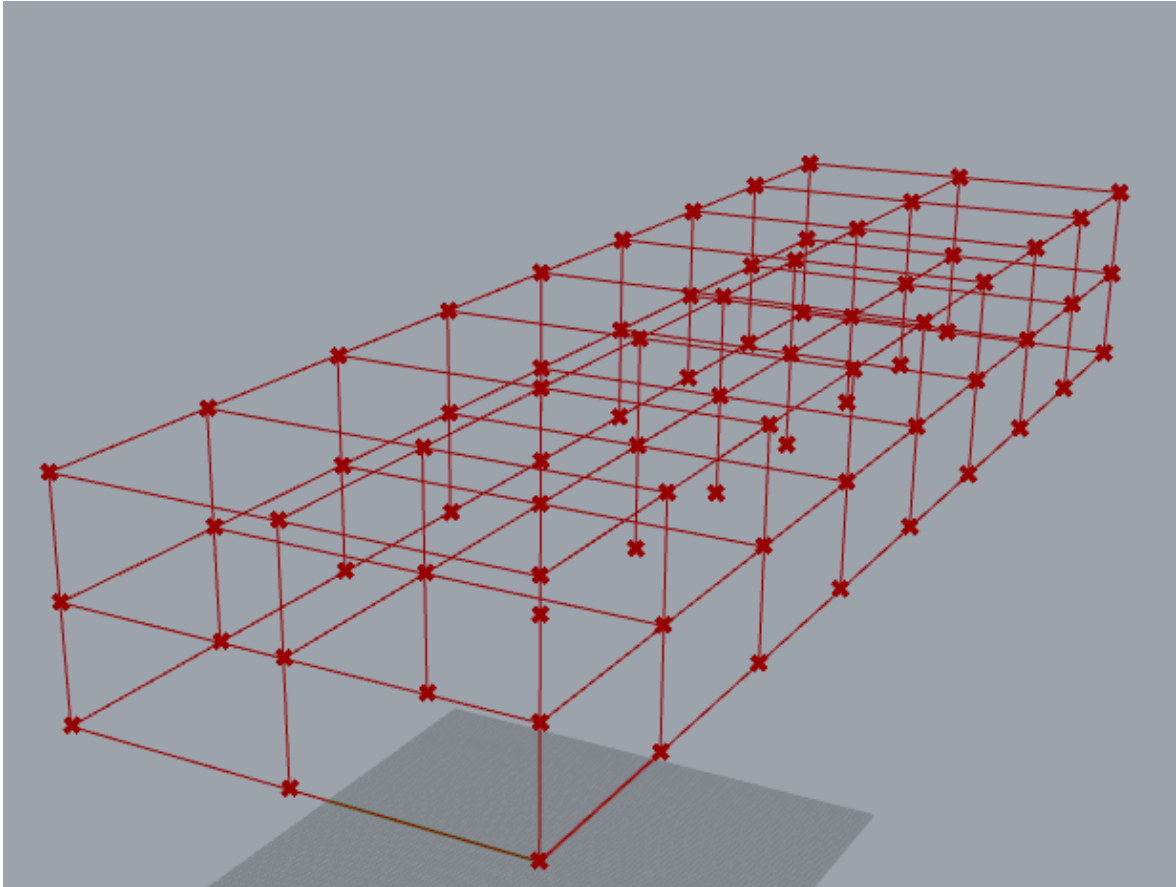
3.2. Parameetrilise geomeetria mudel

3.2.1. Eeldefineeritud komponentide abil loodud geomeetria

Lähteülesande geomeetria oli keerulisem kui Tekla õppevideo näites, kus oli loodud väga lihtne korduv geomeetria. Raskusi oli vajalike elementide eraldamisega nende kohandamiseks (Joonis 31). Näites tehtud mudel oli väga lihtsustatud ning selle eeskujul lähteülesandele vastava geomeetria (Joonis 32) loomine oli keeruline. Selleks tuli paremini osata liste töödelda, kuid piisavat kogemust ei olnud.



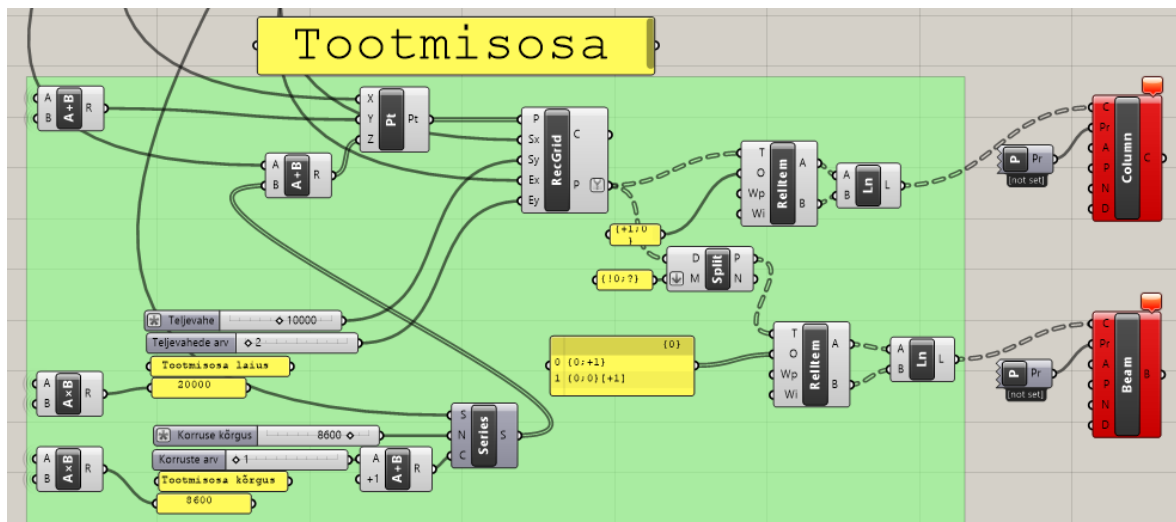
Joonis 31. Näite eeskujul loodud algoritmid.



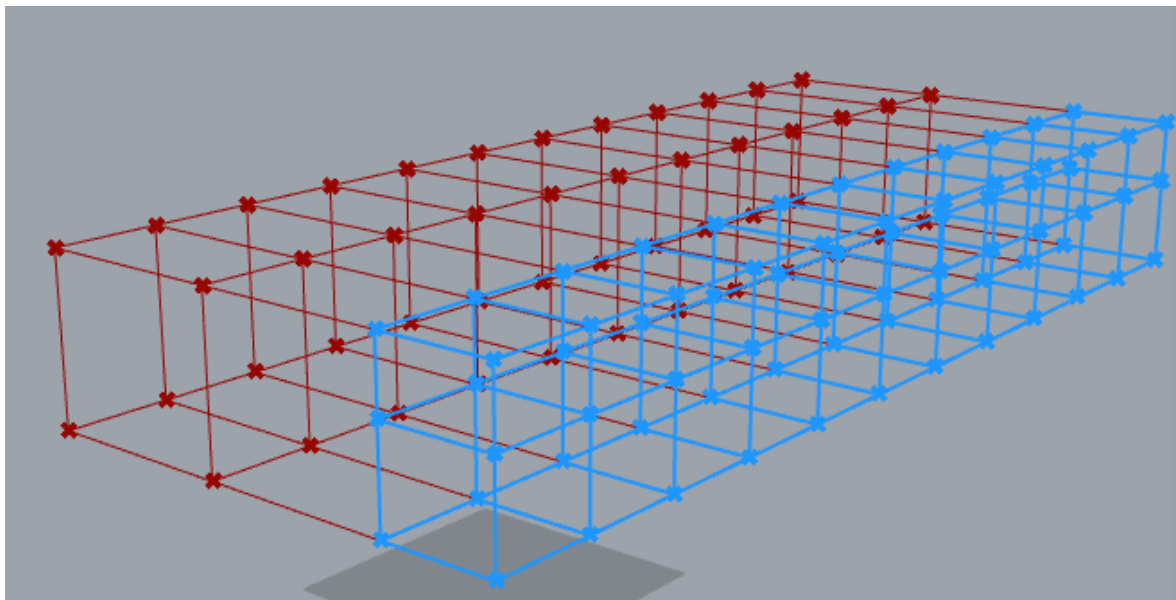
Joonis 32. Näite eeskujul loodud geomeetria.

Kuna näites kasutatud funktsioonide piirides ei õnnestunud vajalikku kuju luua, laiendati valikut ja tehti katsetus iseseisvalt sobiv geomeetria luua (Joonis 33).

Kasutatud sai tasapinnaliste võrgustike loomist ning sealt postide ja talade loomiseks vajalike punktide eraldamist (Joonis 33). Erinevate hooneosade geomeetriad loodi iseseisvana ning ühendati omavahel sidudes ühe osa väljundi teise sisendiga (Joonis 34).



Joonis 33. Tootmisosa loomine.



Joonis 34. Loodud geomeetria, siniselt olmeploki osa.

Keeruline oli eraldada elemente väiksemateks gruppideks. Valida sai terve korruse postid ning laetasapinna kõik talad. Sageli on vahelael üks kandev suund ning talasid oleks vaja erinevalt dimensioneerida. Raskuskohaks oli vähene kogemus tarkvaraga – palju funktsioone, mille võimalused olid autoril uurimata ning listide töötlemise oskus ei olnud piisaval tasemel.

3.2.2. Püütoni skripti kasutamine Grasshopperi komponendina

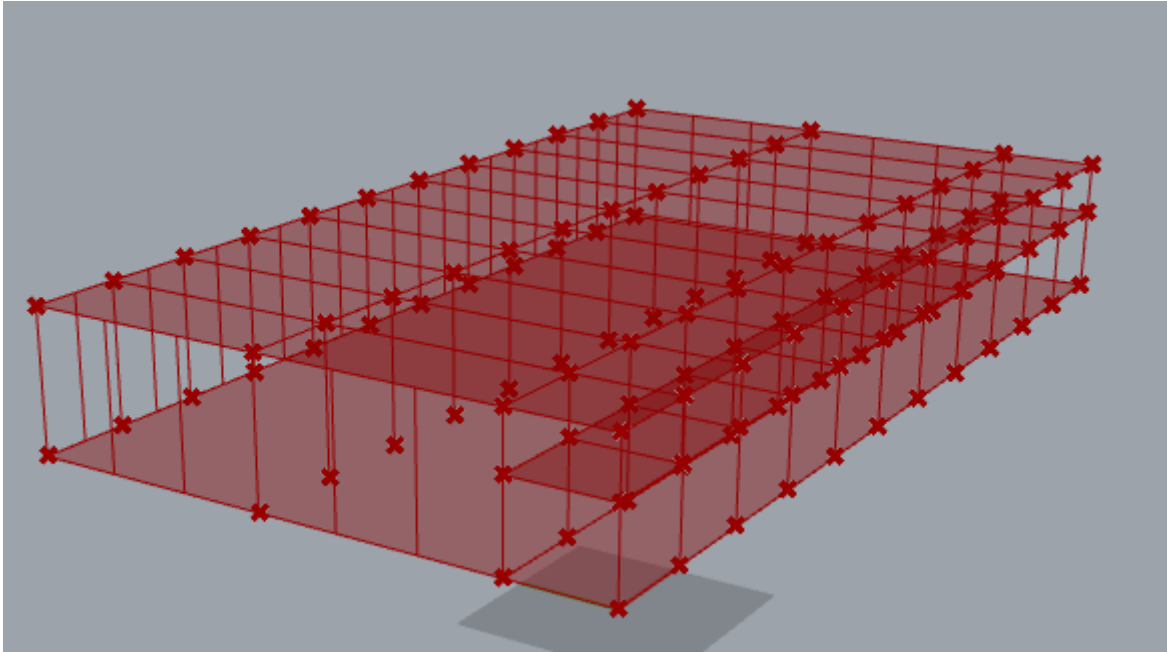
Grasshopper võimaldab komponendis kirjutatud Püütoni skripti kasutada samamoodi nagu eeldefineeritud funktsioone. Püütoni kasutamine kompenseeris Grasshopperi tarkvara

vähem oskamist ja lihtsate funktsioonide kasutamisega sai loodud soovitud geomeetria. Skriptis loodi kõigi vajalike punktide võrgustik ning kasutades indekseid sai joongeomeetria paigutatud vajalikesse kohtadesse sobivalt grupeerituna (Joonis 35).

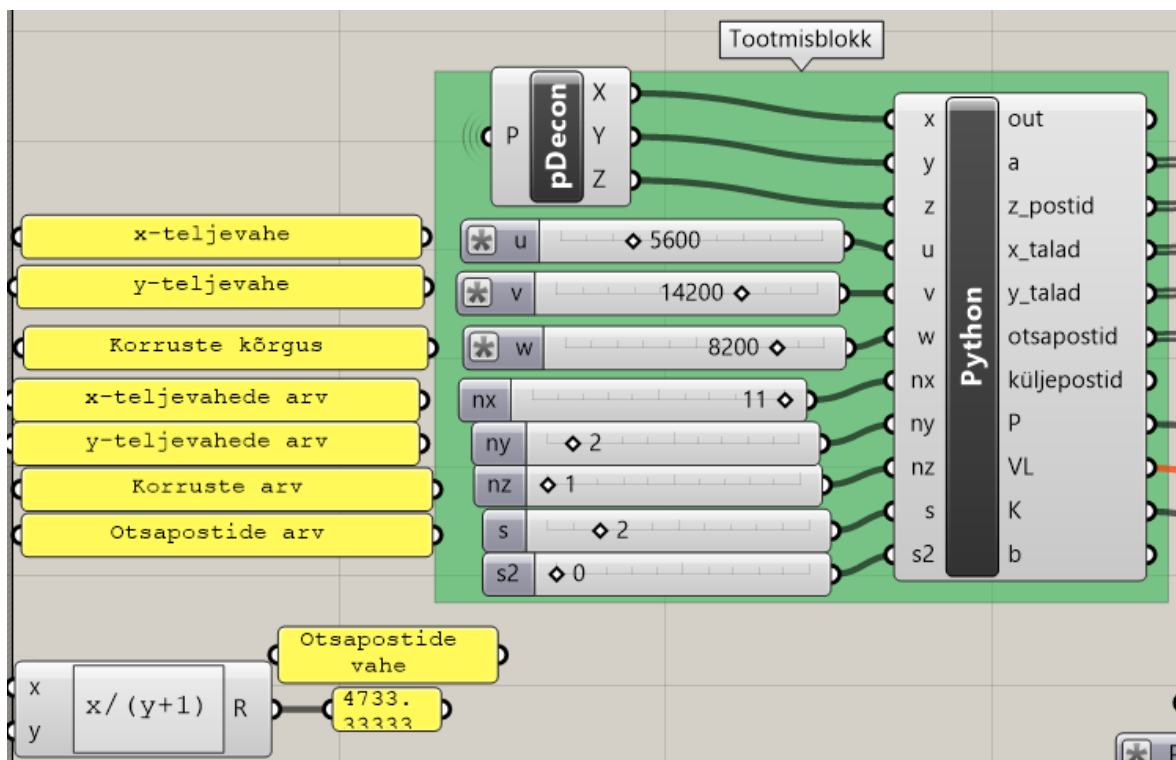
```
1 import rhinoscriptsyntax as rs
2 a=[]
3 for i in range(nx+1):
4     for j in range(ny+1):
5         for k in range(0,2):
6             a.append(rs.AddPoint(i*u+x,j*v+y,k*s1+z))
7             for k in range(1,nz):
8                 a.append(rs.AddPoint(i*u+x,j*v+y,k*w+z+s1))
9 z_postid=[]
10 for i in range(nx+1):
11     for j in range(ny+1):
12         for k in range(nz):
13             z_postid.append(rs.AddLine(a[(ny+1)*(nz+1)*i+(nz+1)*j+k],a[(ny+1)*(nz+1)*i+(nz+1)*j+k+1]))
14 y_talad=[]
15 for i in range(nx+1):
16     for j in range(ny):
17         for k in range(1,nz+1):
18             y_talad.append(rs.AddLine(a[(ny+1)*(nz+1)*i+(nz+1)*j+k],a[(ny+1)*(nz+1)*i+(nz+1)*j+k+nz+1]))
19 x_talad=[]
20 for i in range(nx):
21     for j in range(ny+1):
22         for k in range(1,nz+1):
23             x_talad.append(rs.AddLine(a[(ny+1)*(nz+1)*i+(nz+1)*j+k],a[(ny+1)*(nz+1)*i+(nz+1)*j+k+(ny+1)*(nz+1)]))
```

Joonis 35. Geomeetria loomise Püütoni skript.

Püütonis oli geomeetria loomine lihtsam, kuid aeganõudvam. Väheste lihtsate funktsioonide kasutamisel tuli rohkem aega kulutada loogikale ning enne seda tuli Püütonit õppida. Tulemuseks oli lähteülesandele vastav geomeetria (Joonis 36), mille sisendiks olid muudetavad parameetrid ning väljundid ühendati komponentidega Tekla Structures tarkvarasse eksportimiseks. Ühendades geomeetria Tekla Structures tarkvaraga tekkis sinna mudel, mis on parameetriliselt muudetav läbi Grasshopperi (Joonis 37). Olles leidnud lõpliku lahenduse, saab kasutada käsklust *Bake* Tekla-sse püsiva geomeetria tekitamiseks.



Joonis 36. Püütonis loodud geomeetria.



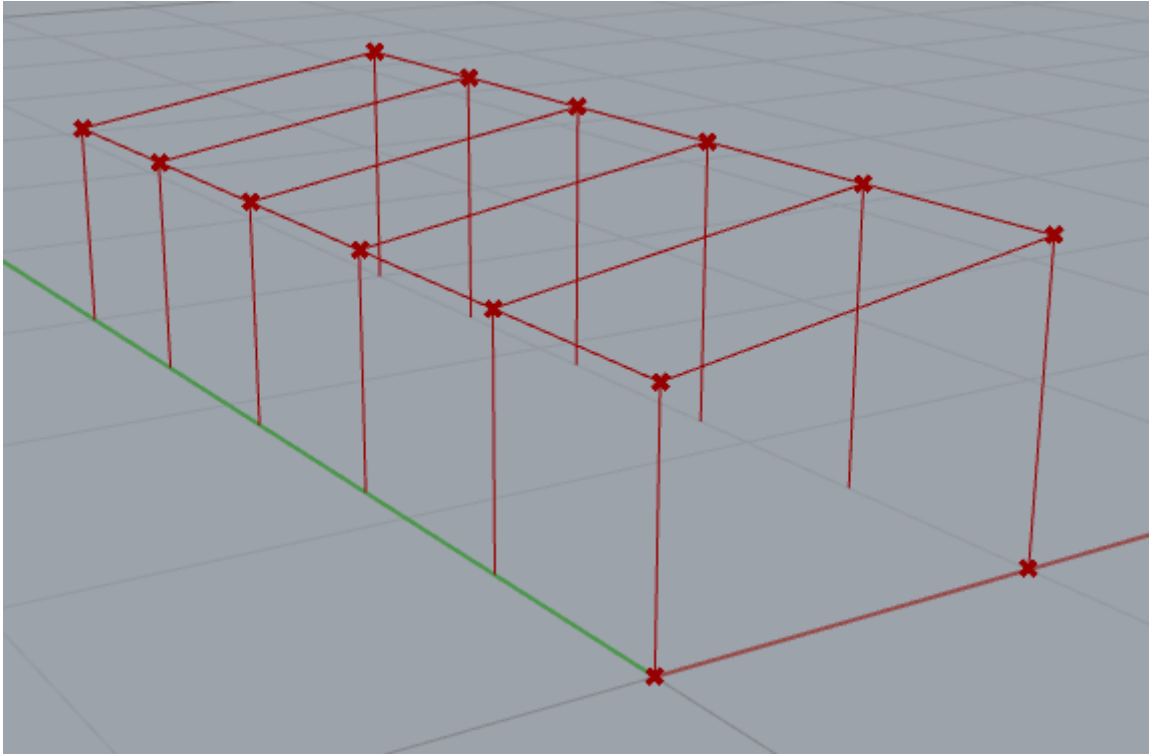
Joonis 37. Tootmisploki parameetrid.

Omades suuremat kogemust Grasshopperi tarkvaraga oleks arvatavasti võimalik sisseehitatud funktsioonide abil luua soovitud geomeetria kiiremini, kuid skripti kirjutamise oskus võib aega kokku hoida spetsiifiliste funktsioonide loomisel, mis Grasshopperiga oleksid keerulised või töömahukad. Loodud mudel on kujutatud Lisas 1.

3.3. Parameetriline arvutusmudel

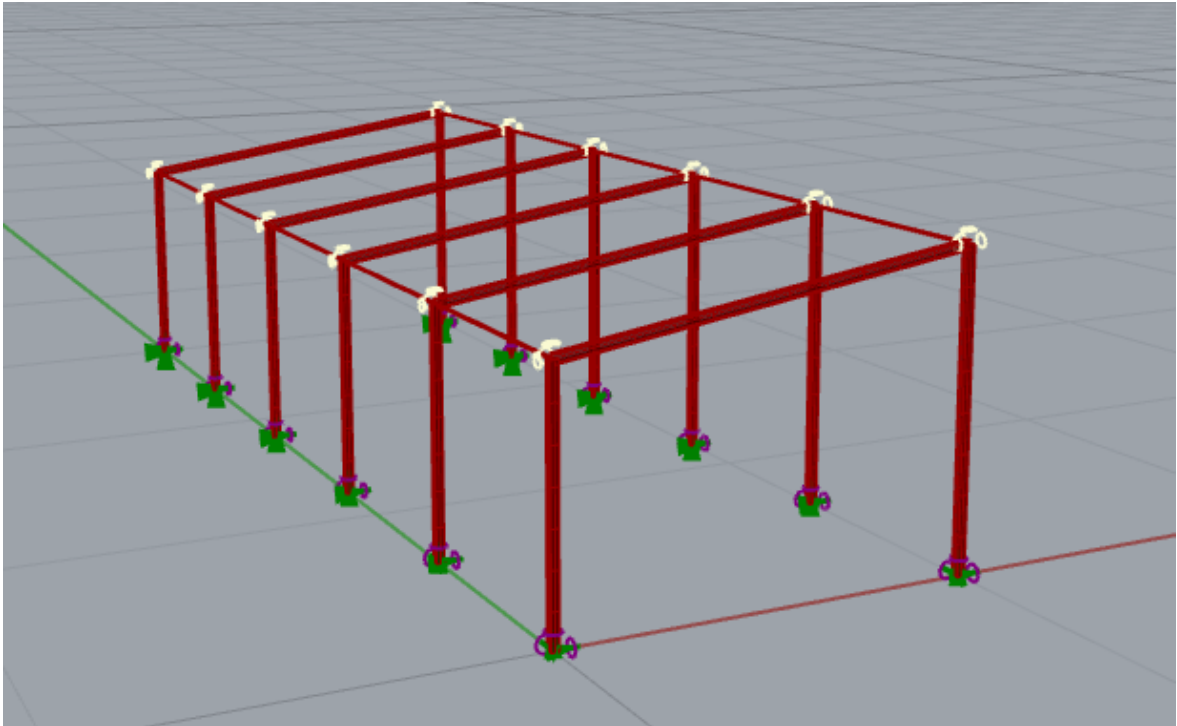
Parameetriline mudel loodi Rhino/Grasshopperi abil ning arvutused tehti Karamba3D pistikprogrammiga. Aega kulus mudeli koostamisele 12 tundi ja 54 minutit.

Parameetrite määramisele ja hoone joongeomeetria loomisele (Joonis 38) kulus aega 29 minutit.



Joonis 38. Loodud joongeomeetria.

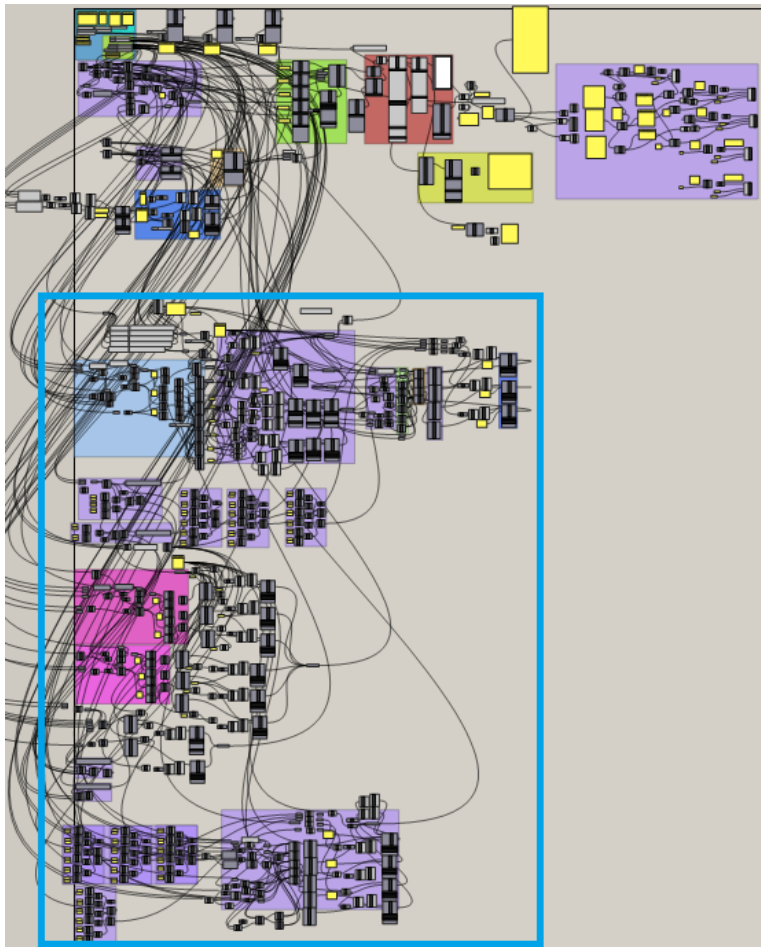
Joongeomeetria seejärel muudeti varraselementideks ning määrati neile toed ja kinnitustingimused (Joonis 39).



Joonis 39. Elementidest koosnev mudel koos kinnitustingimustega.

Kinnitustingimuste, omakaalukoormuse ja lumekoormuse määramisele kulus 29 minutit.

Tuulekoormuse lisamine mudelile oli keerukas ja töömahukas (Joonis 40). Selle peale kulus 7 tundi ja 11 minutit. Geomeetriliste koormustsoonide ja õigete tuulerõhutegurite määramine viisil, mis jääks kehtima ka hoone kuju muutmisel oli keeruline ning läbitud õppematerjalid ei käsitlenud selle tegemist. Tuulekoormus loodi tuulesuundade 180° ja 90° jaoks.

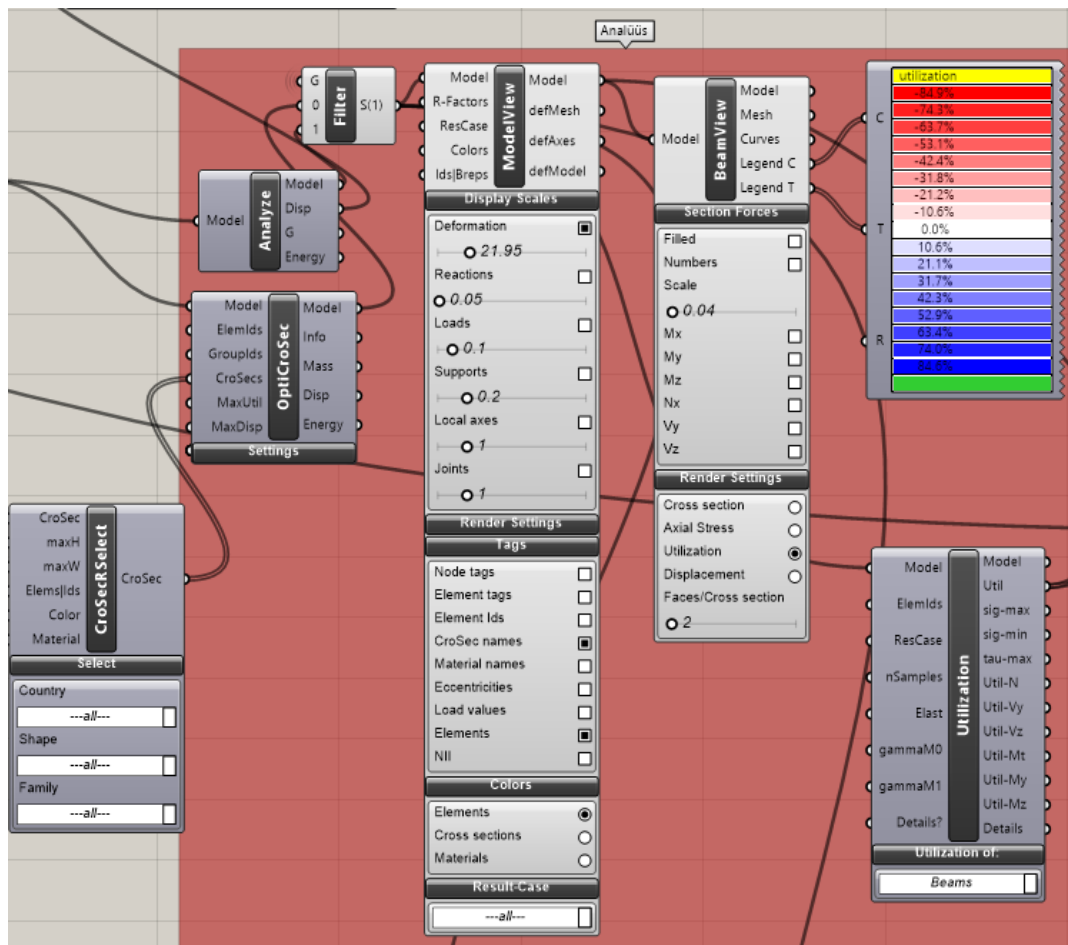


Joonis 40. Tuulekoormuse arvutuse maht.

Kuna tuulekoormus sai mudelile määratud geomeetriliselt, koormustsoonidele vastava pinnakoormusega, siis on selle mõju konstruktsioonile täpsem kui käsitsiarvutustes.

Koormuskombinatsioonide moodustamine ja lisamine mudelile võttis aega 1 tund ja 33 minutit. Koostati kaks kandepiirseisundi ja kaks kasutuspiirseisundi kombinatsiooni.

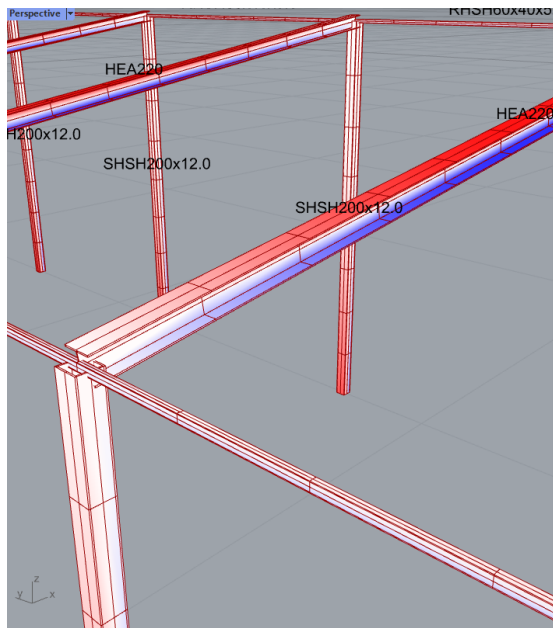
Mudeli analüüsi (Joonis 41) koostamiseks kulus 1 tund ja 27 minutit. Arvutuste tegemiseks kasutati kahte erinevat analüüsikomponenti: *Optimize Cross Section* ning *Analyze*. Esimene neist teostab koheselt peale analüüsi ristlõigete optimeerimise ning tagab mudeli kandevõime. Kuna analüüsitakse mitmeid koormuskombinatsioone ning iga kombinatsiooni jaoks on optimaalsed ristlõiked erinevad, on vaja võimalust manuaalselt määrata sobivad ristlõiked. Ristlõike optimeerimise komponent aga võimaldab kiirelt sobivad ristlõiked välja valida. Peale ristlõigete määramist kasutatakse analüüsi komponenti, et kontrollida kandevõime varu, sisejõudusid ja läbipainet.



Joonis 41. Analüüsi läbiviimise komponendid.

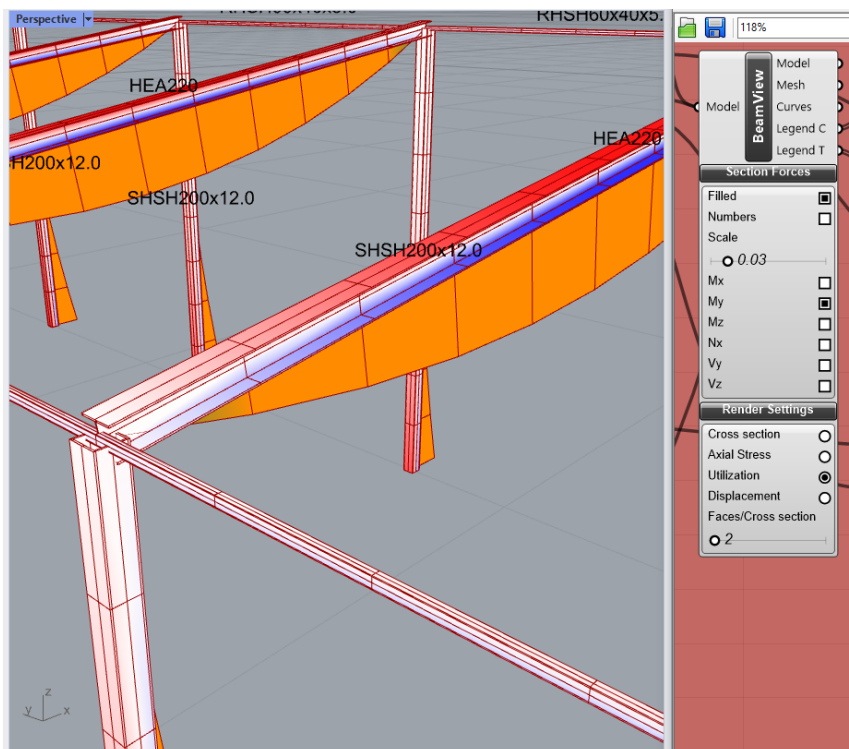
Juhtides analüüsi tulemusi läbi *ModelView* komponendi ja *BeamView* komponendi saab analüüsi tulemusi visualiseerida mudeli peal erinevatel viisidel.

Valides *Beam* view komponendi pealt *Utilization* valiku, saab mudeli peal kontrollida normaalpingete jaotust (Joonis 42). Suurimad tõmbepinged on tumesinised ning suurimad survepinged tumepunased. See võimaldab kiiresti visuaalselt tuvastada rohkem ja vähem koormatud elemendid.



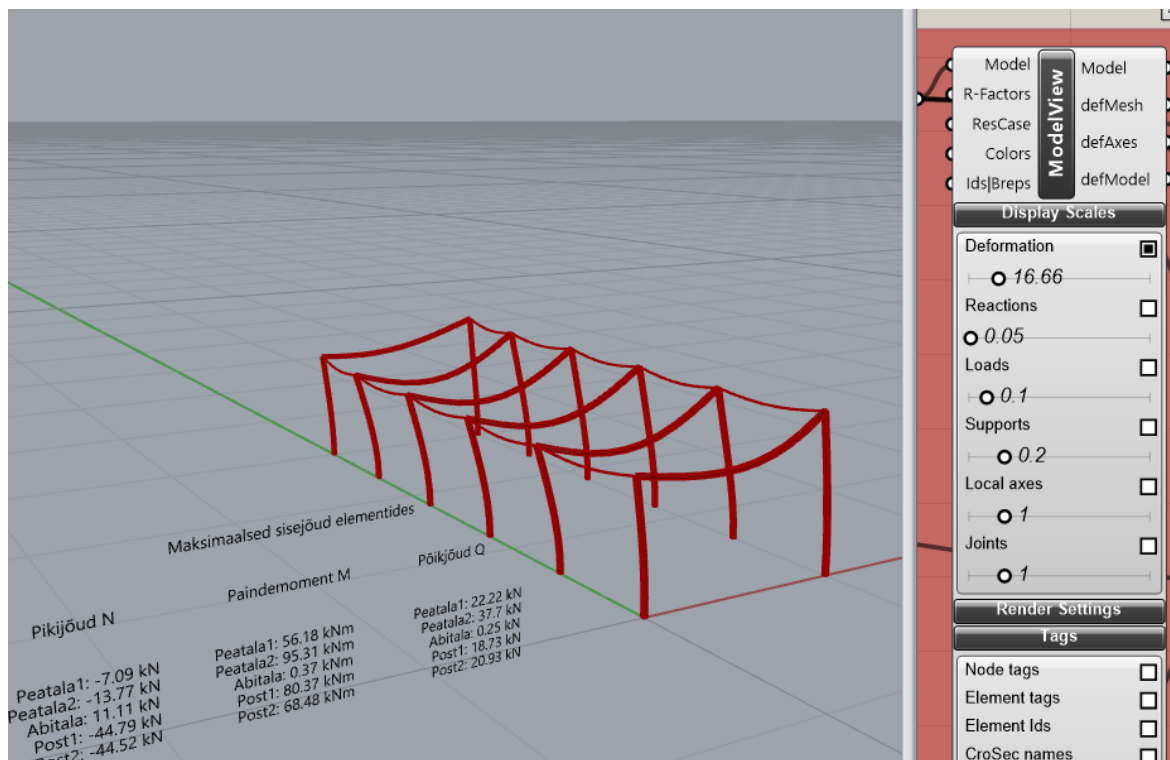
Joonis 42. Normaalingete jaotus elementides.

Section Forces valikud *BeamView* komponendis võimaldavad visualiseerida valitud sisejõu epüüre (võimalus ka lisada arvulised suurused) (Joonis 43). Antud valik võimaldab kiirelt kontrollida arvutuste õigsust ning tuvastada arvutustulemusi mõjutavaid vigasid mudelis.



Joonis 43. Elementide paindemomendi epüürid.

Mudeli deformatsioonide visualiseerimine (Joonis 44) on väga kasulik tööriist, kuna see võimaldab tuvastada vigu mudeli geomeetrisel koostamisel ning aitab konstrueerida hoone jäigastamiseks vajaminevaid sidemeid.



Joonis 44. Mudeli (liialdatud) deformeerumine koormuste mõjul.

Modelleerimisruumis on näha ka sisejõudude arvsuuruste kujutamist (Joonis 44), see demonstreerib võimalust kasutajal kuvada olulist infot mugavas kohas.

Kasutuspiiriseisundis 1 oli mudeli suurima läbipainde suurusks 75 mm. Ristlõigete muutmisel oli seda võimalik vähendada, kuid väiksemaks kui piirläbipaine (50 mm) ei olnud seda võimalik saada. Põhjuseks oli jäikussidemete puudumine. Mudeli geomeetria ei võimaldanud piisavat jäikust tagada isegi suuri ristlõikeid kasutades, näidates diagonaalide vajadust hoone jäigastamiseks.

Arvutusmeetodile lisab oluliselt väärtust, kui hoone konstrueerimisel tehtud vead ilmnevad arvutuste käigus. Lisaks sellele võimaldab mudeli deformatsioonide visuaalne kujutamine määrata jäikussidemeid enim deformeerunud asukohtadesse ning konstrueerida optimaalselt jäigastatud hoone.

3.4. Jõumeetodi arvutused Excelis

Exceli arvutusfaili koostamisele kulus kokku 8 tundi ja 12 minutit.

Tuulekoormuse arvutusele kulus 2 tundi ja 32 minutit. Tasapinnalise arvutusskeemi koostamine koos koormuste teisendamisega võttis aega 43 minutit.

Keskmise raami arvutamiseks (Joonis 46) kulus 4 tundi ja 5 minutit. Algsed paindemomendid olid 101 kNm riivis ning 97 kNm postis (Joonis 45). Tala ristlõikeks valiti HEA 220 ning posti ristlõikeks SHS 180*180*12,5 mm.

Otsmise raami arvutustele kulus 33 minutit, kuna keskmise raami arvutamisel oli eeltöö tehtud. Algsed paindemomendid olid 52 kNm riivis ning 48,5 kNm postis. Tala ristlõikeks valiti HEA 180 ning posti ristlõikeks SHS 140*140*8.8 mm.

Arvutuste tulemusena oli suurim paindemoment riivis sama kui esialgsetes lihtsustatud arvutustes, kuna tegu oli lihttalaga. Postis mõjuv paindemoment oli väiksem, kuna paindekoormus on võrdsemalt jaotatud kui põhiskeemi arvutuste korral.

Keskmise raami arvutus							
staatikaga määramatuse aste							
	w=	-1	=>	kujukindel			
	n=	1	kordselt	staatikaga määramatu			
Materjal	S235			k=	3		
$\sigma_{adm}=M/W_x=$	235	N/mm ²		l=	2		
				t=	6		
Esialgne ristlõike valik							
lihtsustatud M=	102	kNm					
$W_y=M/\sigma_{adm}=$	434	cm ³					
Keskmise tala ristlõige	HEA220						
Omakaal	50.5	kg/m	=	0.505	kN/m	=	g_k
$I_y=$	5410	cm ⁴		Ha=	21.22	kN	
E=	210000	MPa		Va=	42.31	kN	
Keskmine post				Ma=	-97.07	kNm	
lihtsustatud $M_A=$	-124.348	kNm		Hb=	11.14	kN	
				Vb=	36.68	kN	
$W_y=M/\sigma_{adm}=$	-529.141	cm ³	Kontroll:	$\Sigma V=$	0		
Keskmise posti ristlõige	SHS 180x12.5			$\Sigma H=$	0		
$I_y=$	3790	cm ⁴					
Elpost= EI_0				Mriiv	101.1	kNm	
Kanooniline võrrandisüsteem				Mpost= $M_a=$	-97.07	kNm	

Joonis 45. Esialgsete sisejõudude arvutused Excelis.

72	Kanooniline võrrandisüsteem						Kanooniline võrrandisüsteem				
73	$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1f} = 0$						$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1f} = 0$				
74	$\delta_{11} = 1/EI * (1*H^2/2 * 2/3 + (H_1/H_2) * H_1/2 * (2*H_1)/(3*H_2))$						$\delta_{11} = 1/EI * (1*H^2/2 * 2/3 + (H_1/H_2) * H_1/2 * (2*H_1)/(3*H_2))$				
75	$EI\delta_{11} =$	3.78	m ³				$EI\delta_{11} =$	3.78	m ³		
76	$\Delta_{1f} = 1/EI * 97.1*H_1/2 * 2/3$						$\Delta_{1f} = 1/EI * 97.1*H_1/2 * 2/3$				
77	$EI\Delta_{1f} =$	129.42	kNm ³				$EI\Delta_{1f} =$	64.71	kNm ³		
78	$X_1 = -\Delta_{1f}/\delta_{11} =$	-34.24	kNm				$X_1 = -\Delta_{1f}/\delta_{11} =$	-17.12	kNm		

Joonis 46. Jõumeetodi lahendamine Excelis.

Keskmise raami suurimad paindemomendid olid 101 kNm riivis ja 56 kNm postis. Otsmise raami suurimad paindemomendid olid 52 kNm riivis ja 28 kNm postis (Joonis 47).

81	Paindemomendid						Paindemomendid				
82	$M_0 + m_1X_1$						$M_0 + m_1X_1$				
83	$M_A =$	37.32	kNm				$M_A =$	18.66	kNm		
84	$M_D =$	-34.24	kNm				$M_D =$	-17.12	kNm		
85	$M_E =$	102	kNm				$M_E =$	57	kNm		
86	Põikjõud						Põikjõud				
87	$Q_{AB} =$	-9.58	kN				$Q_{AB} =$	-4.79	kN		
88	$Q_{BA} =$	-2.86	kN				$Q_{BA} =$	-1.43	kN		
89	$Q_{CD} =$	-2.86	kN				$Q_{CD} =$	-1.43	kN		
90	$Q_{DC} =$	11.99	kN				$Q_{DC} =$	6.00	kN		
91	$Q_{BE} =$	34.27	kN				$Q_{BE} =$	18.53	kN		
92	$Q_{EB} =$	6.53	kN				$Q_{EB} =$	4.15	kN		
93	$Q_{EC} =$	-6.53	kN				$Q_{EC} =$	-4.15	kN		
94	$Q_{CE} =$	-32.77	kN				$Q_{CE} =$	-16.05	kN		
95	Pikijõud						Pikijõud				
96	$N_{A-B} =$	-34.27	kN				$N_{A-B} =$	-18.53	kN		
97	$N_{B-C} =$	-2.86	kN				$N_{B-C} =$	-1.43	kN		
98	$N_{C-D} =$	-32.77	kN				$N_{C-D} =$	-16.05	kN		

Joonis 47. Sisejõudude arvutus Excelis.

Enne uute ristlõigete määramist kontrolliti varraste stabiilsust. Kuna tegu on lihttaladega, mille kiive on takistatud ei teki stabiilsusprobleeme ning talade lõplikuks ristlõikeks saab HEA 220 keskmisel raamil ja HEA 180 otsmisel raamil.

Postidel kontrollitakse nõtkekandevõimet, painde ja surve koosmõju ning põikjõu kandevõimet (Joonis 49). Stabiilsuskontrollile ristlõikeid dimensioneerides (Joonis 48) saab keskmise raami posti ristlõikeks SHS 180*180*6.3 mm ning otsmise raami posti ristlõikeks SHS 120*120*8 mm.

99	Dimensioneerimine							Dimensioneerimine			
100	Tala							Tala			
101	maxM=	102.00	kNm					maxM=	56.70	kNm	
102	σ_{adm} =	235	N/mm ²					σ_{adm} =	235	N/mm ²	
103	W_x =	434.04	cm ³		W_y =	515.2	cm ³	W_x =	241.28	cm ³	
104	Ristlõike valik	HEA220			I_y =	5410	cm ⁴	Ristlõike valik	HEA180		
105											
106	Post							Post			
107	maxM=	37.32	kNm					maxM=	18.66	kNm	
108	σ_{adm} =	235	N/mm ²					σ_{adm} =	235	N/mm ²	
109	W_y =	158.81	cm ³					W_y =	79.41	cm ³	
110	Ristlõike valik	SHS 180x6.3						Ristlõike valik	SHS 100x8		

Joonis 48. Ristlõigete dimensioneerimine.

Nõttekandevõime on tagatud suure varuga: keskmise raami postil kasutatud kõigest 5 % kandevõimest ning otsmise raami postil 2,65 %. Painde ja surve koosmõjul on keskmise raami posti kandevõime ära kasutatud 97,1 % piires ning otsmise raami posti kandevõime 98,4 % piires. Põikjõu kandevõime on samuti tagatud suure varuga: keskmise raami postil 5,85 % kandevõimest ning otsmise raami postil 3,45 % kandevõimest.

112	Posti nõttekandevõime arvutus	SHSH 180x6.3	Materjal	S235		Posti nõttekandevõime arvutus	SHSH 100x8	Materjal	S235					
113	$N_{b,rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} =$	815.9703	kN	E=	210000	MPa	$N_{b,rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} =$	337.93	kN	E=	210000	MPa		
114	RLK	1		$f_y =$	235	MPa	RLK	1		$f_y =$	235	MPa		
115	A=	43.35	cm ²	$\gamma_{M1} =$	1		A=	14.38	cm ²	$\gamma_{M1} =$	1			
116	$\mu =$	0.7		$\gamma_{M0} =$	1		$\mu =$	0.7		$\gamma_{M0} =$	1			
117	tingsaledus λ =	0.791		$W_y =$	240.9	cm ³	tingsaledus λ =	0		$W_y =$	79.92	cm ³		
118	$\lambda =$	74.3					$\lambda =$	0.0						
119	$l_{eff} =$	5.25	m	$k_{yy} =$	0.926		$l_{eff} =$	0	m	$k_{yy} =$	0.915			
120	i=	7.07	cm	$k_{zz} =$	0		i=	3.73	cm	$k_{zz} =$	0			
121	nõttekõver	a		$C_{my} =$	0.9		nõttekõver	a		$C_{my} =$	0.9			
122	$\alpha =$	0.21					$\alpha =$	0.21						
123	$\phi =$	0.875		=	0.922	≤	0.930	$\phi =$	0.479		=	0.890	≤	0.939
124	$\chi =$	0.801					$\chi =$	1						
125	Painutatud ja surutud varda kandevõime						Painutatud ja surutud varda kandevõime							
126	$N_{Ed}/N_{b,rd} + k_{yy} M_{y,Ed}/M_{b,rd} \leq 1.0$						$N_{Ed}/N_{b,rd} + k_{yy} M_{y,Ed}/M_{b,rd} \leq 1.0$							
127	$N_{Ed} =$	34.27	kN				$N_{Ed} =$	18.53	kN					
128	$M_{Ed} =$	37.32	kNm				$M_{Ed} =$	18.66	kNm					
129	$M_{b,rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} =$	56.61	kNm				$M_{b,rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} =$	18.78	kNm					
130	$\chi_{LT} =$	1					$\chi_{LT} =$	1						
131														
132	$N_{Ed}/N_{b,rd} + k_{yy} M_{y,Ed}/M_{b,rd} =$	0.652641	<=	1			$N_{Ed}/N_{b,rd} + k_{yy} M_{y,Ed}/M_{b,rd} =$	0.963754	<=	1				
133														
134	Posti põikjõukandevõime arvutus						Põikjõukandevõime arvutus							
135	$A_v = 2ht_w =$	2268	mm ²				$A_v = 2ht_w =$	1600	mm ²					
136	$\eta =$	1.2					$\eta =$	1.2						
137	$V_{pl,rd} = A_v f_y / (\sqrt{3} * \gamma_{M0}) =$	307.72	kN				$V_{pl,rd} = A_v f_y / (\sqrt{3} * \gamma_{M0}) =$	217.08	kN					
138	$V_{Ed} =$	11.99	kN				$V_{Ed} =$	6.00	kN					
139														
140	h=	180	mm				h=	100	mm					
141	$t_w =$	6.3	mm				$t_w =$	8	mm					

Joonis 49. Üldstabiilsusarvutused.

Tala läbipaindeks osutus arvutuse alusel 63,6 mm (~L/157), mis on väljaspool lubatud piiri (L/200 = 50 mm). HEA 260 ristlõike korral on läbipaine 48,5 mm, mis on lubatud piirides.

3.5. Võrdlus

Ettevalmistustele kulunud aeg on Exceli arvutuste puhul null, kuna vajalikud oskused on koolis omandatud enne lõputöö tegemise alustamist. Mudeli puhul kulus väljaõppele 52 tundi ja 20 minutit (Tabel 1).

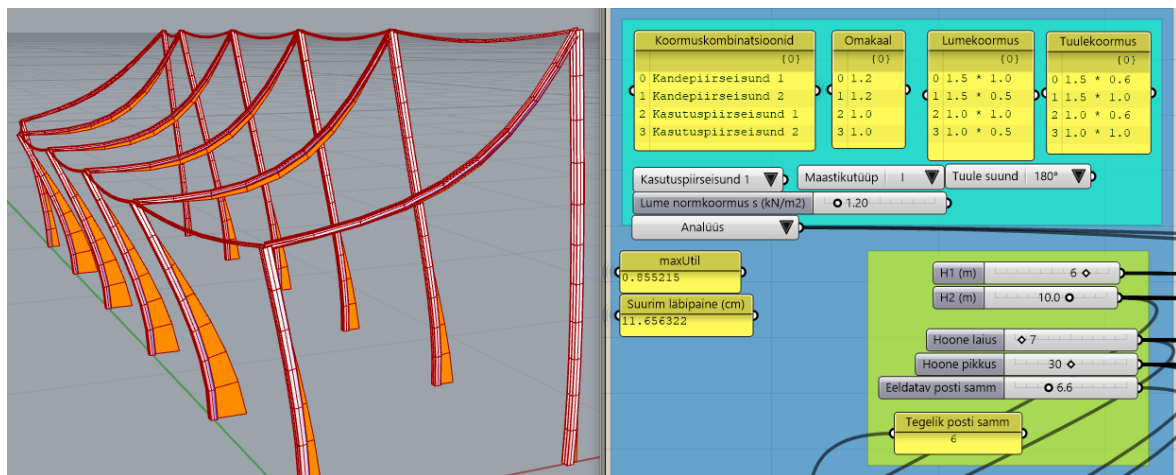
Arvutusmudeli koostamisele kulunud aeg on esitatud alljärgnevalt (Tabel 2).

Tabel 2. Analüüsi ajaline võrdlus

AJA ANALÜÜS					
Grasshopper/Karamba3D	Aeg		Excel	Aeg	
Kirjeldus	tundi	minutit	Kirjeldus	tundi	minutit
Hoone geomeetria		28	Tuulekoormuse arvutus	2	32
Tuulekoormuse arvutus	7	10			
Toed/liigendid/koormused		28	Arvutusskeemi koostamine		43
Koormuskombinatsioonid	1	33			
Analüüs		20	Keskmise raami arvutus	4	5
Jäikus/Läbipaine	1	22			
Tulemuste visualiseerimine	1	8	Otsmise raami arvutus		33
Arvutuste kontrollimine		24	Läbipainde arvutus		19
KOKKU:	12	53		8	12

Lähteandmete muutmisele kuluva aja võrdlemiseks muudeti lähteülesande sildeks $l = 7$ m ning kõrguseks $H_2 = 10$ m. Sellest tulenevalt on hoonele vaja määrata uued ristlõiked ning teha kandevõime kontroll.

Mudelis tehakse selleks ristlõigete optimeerimine erinevate koormuskombinatsioonide jaoks, valitakse sobivad ristlõiked ning kontrollitakse tulemust analüüsiga. Kokku kulub lähteandmete muutmisele, ristlõigete optimeerimisele, selle järgi uute ristlõigete valimisele ning analüüsi tegemiseks 4 minutit ja 27 sekundit (Joonis 50). Silde vähenemise tõttu sai tala väiksema ristlõike HEA 140, postil jäi ristlõikeks SHS 200*200*12 mm, kuid kõrguse H_2 suurenemise tõttu on posti deformatsioon oluliselt suurem.



Joonis 50. Mudeli tulemused peale lähteandmete muutmist.

Excelis lähteandmete muutmine ning uute ristlõigete valimine ja kontrollimine võttis aega 8 minutit ja 42 sekundit. Tala ristlõikeks sai HEA 160 ning posti ristlõikeks SHS 200*200*6 mm.

Exceli arvutuste puhul kulus peaaegu kaks korda rohkem aega ning kuna selle juures oli palju manuaalset tööd, siis on vigade tegemise tõenäosus suurem.

Kõige suurem erinevus arvutustulemustes on põhjustatud tuulekoormuse arvutusest. Käsitsiarvutuses on keeruline teisendada A, B ja C tsoonide tuulekoormusi kahemõõtmelise arvutusskeemi jaoks ning seda arvutustes kasutada. Üldjuhul seda arvestatakse jäikussidemete konstrueerimisega, kuid tasapinnalise raami arvutusest jäetakse see välja. Mudelis koostati tuulekoormus pinnakoormusena vastavalt koormustsoonidele ning arvutustes kajastub mudeli ruumiline stabiilsus. Käsitsiarvutusel tuleb hoone jäikussüsteem muul viisil konstrueerida.

Parameetrilise mudeli puhul tuli välja, et antud geomeetrilise mudeli puhul ei olnud võimalik läbipainet saada lubatud piiridesse ristlõike muutmise abil, vaid vaja on lisada jäikussidemeid. Tasapinnalise raami arvutamisel ei arvestata hoone üldstabiilsust ning ristlõige HEA 260 tagas lubatava läbipainde. Sellise arvutusmetoodika puhul peab mees pidama jäikussidemete lisamise vajadust ning oskama neid ka konstrueerida. Mudelis väljendub vähene jäikus arvutustulemustes ning ka vähem kogenud inseneril on neid lihtne märgata ja parandada.

Mudel pakub erinevaid valikuid tulemuste visualiseerimiseks: tekitab sisejõuepüürid, näitab deformatsioone ja kandevõimevaru. Käsitsiarvutustel tuleb vastavad arvutused ja joonised ise juurde teha.

Peamised erinevused arvutustulemustes on tingitud sellest, et käsitsiarvutustes on tehtud lihtsustusi, kuid programm arvutab tulemused täpselt. Tulemusi võib ka mõjutada tarkvara arvutuste põhinemine lõplike elementide meetodil (LEM) ning käsitsiarvutuse põhinemisel tugevusõpetuse ja ehitusmehaanika valemitel.

3.6. Tulemuste tõlgendamine

Tarkvara oli lihtne kasutada ning andis head tulemused konstruktsiooniarvutustel. Mudeli konstruktsiooniarvutuste tulemusi võib pidada usaldusväärsemaks, kuna tehti ruumilise konstruktsiooni kohta väheste lihtsustustega. Parameetrilise arvutusmudeli koostamisele kulus umbes 1,5 korda rohkem aega (~4 tundi) kui käsitsiarvutuse Exceli mallile. Muudatuste tegemisel kulus aga Exceli arvutuste kohandamisele umbes 2 korda rohkem aega kui mudeli omadele.

Mudeli eelis on seega suurem projekti varajastes staadiumites kui muudatusi esineb rohkem. Mudeli eelis on ka võimaluses loodud mudelit projekteerimistarkvaradesse eksportida edasiseks projekteerimiseks.

Käsitsiarvutuste tegemiseks vajalikud oskused omandati eriala õppimise käigus. Mudeli koostamiseks oli vaja aega kulutada tarkvara õppimisele – 52 tundi ja 20 minutit. See on võrreldav 2 EAP-ga kui seda tarkvara õpetataks koolis.

Ajakasutuse analüüs tugineb autori kogemusele lõputöö kirjutamise käigus. Kuna inimesed õpivad erineva kiirusega ei saa teha lõplikke järeldusi tarkvara õppimisele kuluva aja osas, analüüsi eesmärk on anda näitlik ajakulu ligikaudseks hindamiseks.

KOKKUVÕTE

Lõputöö autori põhieesmärgiks oli uurida uudsete tarkvarade poolt pakutavaid võimalusi projekteerimise efektiivsuse tõstmisel ning nende kasutamise käigus analüüsida nende kasutuselevõtmise teostatavust.

Kirjanduse analüüsi eesmärgiks oli anda ülevaade infotehnoloogiliste lahenduste kasutamisevõimalustest projekteerimisvaldkonna digitaalseks kaasajastamiseks.

Sissejuhatuseks andis autor ülevaate ehitusvaldkonna tehnoloogilise arengu taustast. Võrreldes teiste valdkondadega on ehitussektor digitaalses arengus maha jäänud ning see on põhjustanud süveneva madala tootlikkuse probleemi. Selgus, et viimase kahekümne aasta jooksul on sektori aastase tootlikkuse määr tõusnud kõigest 1 %. BIM on teinud suuri jõupingutusi ehitusvaldkonna digitaliseerimiseks, kuid seda pidurdab innovaatiliste infotehnoloogiliste arenduste aeglane kasutusele võtmine. Autor andis ülevaate ka parameetrilise modelleerimise kohta.

Parameetrilise modelleerimise tarkvara on olnud kättesaadav üle 30 aasta, kuid ehitusvaldkonnas leidis ta kasutust tunduvalt hiljem. Aktiivsemalt hakati seda kasutama peale tarkvaravalikute mitmekesistumist ning sellest tulenevalt kasutuslihtsuse suurenemist. Parameetrilise modelleerimise põhitingimuseks on kirja panna algoritmid, mis võimaldavad arvutil täide viia soovitud funktsioone. Algoritmide abil on võimalik arvuti panna tegema väga keerulisi ja mahukaid ülesandeid. Praktikas aga suureneb algoritmide kirjutamise keerulisus kiiresti ning mõistlikum on kasutada ainult vajalikke ning võimalikult lihtsaid seoseid.

Algoritmide kirjutamiseks arvutile arusaadaval viisil on vaja kasutada programmeerimiskeelt. Tekstilised programmeerimiskeeled leiavad ehitusvaldkonnas vähe kasutust, kuna nende õppimiseks kuluv aeg on liiga pikk. Visuaalse programmeerimise tarkvarad võimaldavad programme koostada palju suurema kasutuslihtsusega oluliselt vähendades õppimiseks kuluvat aega. Visuaalse programmeerimise tarkvarad on piisavalt võimekad, et projekteerija võib neid kasutada ning mitte tunda vajadust üle minna tekstilisele programmeerimisele. Tekstilised programmeerimiskeeled on kiiremad ja

paindlikumad kui visuaalsed programmeerimiskeeled. Kui projekteeritakse keerulisi ja suuremahulisi hooneid, siis võib tekstilise programmeerimiskeele õppimisele kulutatud aeg end ära tasuda.

Autor tõi ka näiteid uurimistöödest, mis käsitlesid parameetrilise modelleerimise kasutusele võtmise võimalusi ning nende praktilist teostatavust. Arhitektuuribüroos kasutamine võimaldas lühikesest tähtajast hoolimata ellu viia keerulise ülesande õigeaks ajaks. Infotehnoloogia arengus nähti potentsiaali tulevikus konstruktsiooniarvutusi edukamalt automatiseerida. Visuaalse programmeerimise tarkvaras nähakse suurt potentsiaali lisaks parameetrilisele modelleerimisele ka parandada arhitektide ja inseneride vahelist koostööd. Uudsed tarkvaralahendused avavad ka ukSED igasugustele simulatsioonitarkvaradele, mis võimaldavad näiteks võtta projekteerimisel arvesse hoone tulevast energiatõhusust.

Parameetrilise geomeetria mudeli loomise käigus uuris autor erinevaid võimalusi geomeetria loomiseks ning hindas nende efektiivsust arvestades väljaõppetaset. Tekstilise skripti kasutamine võib lubada visuaalse programmeerimise kasutamisel tekkivate probleemide ületamist, kuid visuaalse programmeerimise tarkvara parem tundmine on tõhusam. Parameetrilist geomeetriat õnnestus väga edukalt teisaldada Tekla Structures projekteerimistarkvarasse, kus saab peale lõpliku lahenduse leidmist geomeetria püsivaks muuta.

Parameetrilise arvutusmudeli abil uuriti selle loomisele kuluvat aega võrreldes käsitsiarvutusega Excelis. Parameetriline arvutusmudel nõudis rohkem aega kui Exceli arvutusfail, kuid parameetrilise arvutusmudeli tulemused olid rohkemate kasutusvõimalustega. Parameetriline arvutusmudel arvestas mudeli ruumilist stabiilsust, mis võimaldab arvutuste tulemusena konstrueerida hoone jäikussüsteem. Lähteülesande muudatuste sisse viimisel kulus tulemuste saamiseks Exceli arvutusfaili kasutamisel umbes kaks korda rohkem aega kui parameetrilise mudeliga. Parameetrilise arvutusmudeli suurim efektiivsus on projekti algstaadiumites, kus muudatusi esineb rohkem.

Autori hinnangul on lõputöö raames kogutud informatsioon ning loodud mudelite analüüs heaks aluseks selle põhjal projekteerimisvaldkonnas uudsete tarkvaralahenduste kasutusele võtmiseks. Töö autor tunneb, et lõputöö tegemise käigus omandas arvestava vilumuse

käsitletud tarkvara kasutamisel ning uute tarkvarade õpetamine ülikoolis annaks projekteerijatele kõrge väärtusega oskuseid tööturule sisenemisel.

Lõputöö käigus oli peamiseks eesmärgiks keskenduda uudsete tarkvaralahenduste praktilisele teostatavusele, mille baasilt oleks võimalik projekteerimisprotsessi efektiivistada. Vaja oleks uurida parameetrilise modelleerimise kasutamise võimalusi nii suurte kui väikeste ehitusprojektidega hindamiseks selle efektiivsust sõltuvalt mastaabist. Magistrandi hinnangul on käsitletud tarkvaralahendused efektiivsed ning neid on võimalik kasutada väikese ressursikuluga.

KASUTATUD KIRJANDUS

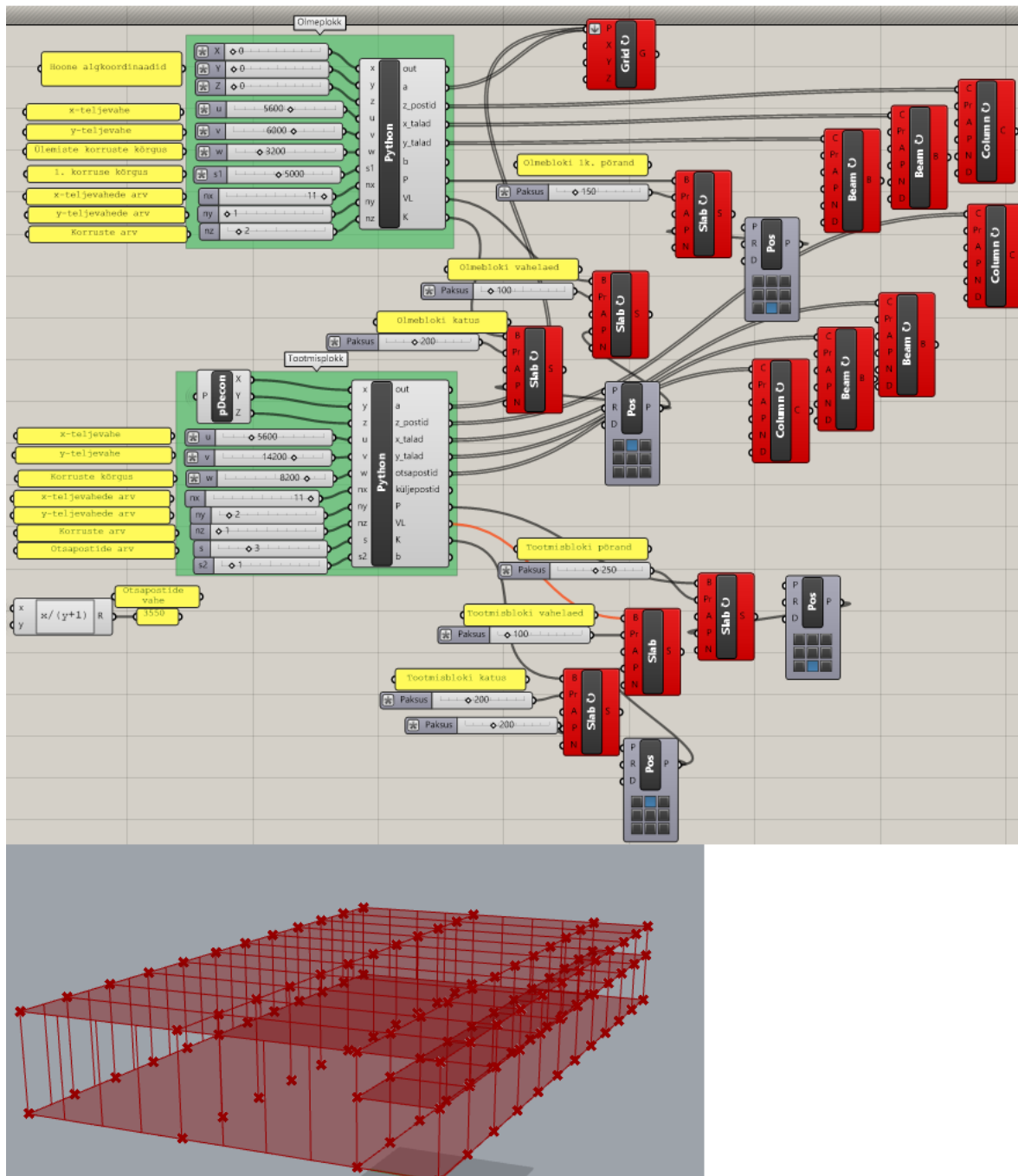
- [1] **S. Gale**, "Rethinking productivity across the construction industry: The challenge of change," ., 2016. Available:
https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/solutions/bim/images/stories/EIU_Autodesk_Construction_WEB.pdf.
- [2] **S. Ahmed**, *Modern Construction: Lean Project Delivery and Integrated Practices*. 2010.
- [3] **M. Spelman ja B. Weinelt**, "Demystifying digitization," Accenture, 2016.
- [4] **EU BIM Taskgroup**, "Ehitusinformatsiooni modelleerimise kasutuselevõtmise käsiraamat Euroopa avalikule sektorile," 2017.
- [5] **McKinsey Global institute**, "Reinventing Construction: A Route To Higher Productivity," 2017.
- [6] **UK NAO**, "Modernising Construction," 2001.
- [7] **K. Manley et al**, "The potential contribution of small firms to innovation in the built environment," in 2008, .
- [8] **ISO**, "Framework for building information modelling (BIM) guidance," 2012.
- [9] **H. Park**, "Ühtne Infokeskkond Projekteerimisprotsessi Läbiviimiseks - Infotehnoloogiline Vaade." , Eesti Maaülikool, Tartu, 2018.
- [10] **L. Ustinovičius et al**, "Challenges of BIM technology application in project planning," *Engineering Management in Production and Services*, vol. 10, pp. 15-28, 06, 2018.
- [11] **J. Kraatz, K. Hampson ja A. Sanchez**, "The global construction industry and R&D," in Anonymous 2014, pp. 4-23.
- [12] **E. W. Weisstein**, *Concise Encyclopedia of Mathematics*. 1999.

- [13] (25.05.2021). *Programmeerimise algkursus*. Available: https://courses.cs.ut.ee/all/MTAT.03.100/2012_fall/uploads/opik/04_algoritm.html.
- [14] (30.05.2021). *Generative Design*. Available: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>.
- [15] (06.08.2013). *A History of Parametric*. Available: <https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>.
- [16] **RTC (Revit Technology Corporation)**, "Revit technology corporation launches industry's first parametric building modeler", 2000.
- [17] **T. Wortmann ja B. Tunçer**, "Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction," *Des Stud*, vol. 52, pp. 173-197, 2017. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.05.004>.
- [18] **J. Sáez-López, M. Román-González ja E. Cano**, "Visual programming languages integrated across the curriculum in elementary school: A two year case study using Scratch in five schools," *Comput. Educ.*, vol. 97, pp. 129-141, 03, 2016.
- [19] (30.05.2021). *Food4Rhino*. Available: <https://www.food4rhino.com/en>.
- [20] **I. Caetano ja A. Leitão**, "Integration of an algorithmic BIM approach in a traditional architecture studio," *Journal of Computational Design and Engineering*, vol. 6, (3), pp. 327-336, 2019. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.11.004>.
- [21] **D. Warren**, "Parametric modelling in construction: Investigating the quality of rule-based checking," in 2019, .
- [22] **T. Hamidavi, S. Abrishami ja M. R. Hosseini**, "Towards intelligent structural design of buildings: A BIM-based solution," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, pp. 101685, 2020. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101685>.
- [23] (30.05.2021). *30 St Mary Axe: 10 Interesting Facts And Figures About The Gherkin*. Available: <https://londontopia.net/site-news/featured/30-st-mary-axe-10-interesting-facts-figures-gherkin/>.

- [24] **E. Touloupaki ja T. Theodosiou**, "Optimization of Building form to Minimize Energy Consumption through Parametric Modelling," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 38, pp. 509-514, 2017. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.114>.
- [25] Togg Track, "Togg Track," 2006.
- [26] Rhinoceros 3D, "Rhinoceros 3D," (7), 1998.
- [27] **D. Rutten**, "Grasshopper," 2007.
- [28] Tekla Structures, "Tekla Structures," (2021), .
- [29] Karamba 3D, "Karamba 3D," (1.3.3), 2010.
- [30] Microsoft Excel, "Microsoft Excel," 1987.
- [31] Ftool, "Ftool," (2.11), 1995.
- [32] (07.03.2021). *Grasshopper-Tekla Live Link - Demo Videos - Building Frame*. Available: https://teklastructures.support.tekla.com/not-version-specific/en/ext_grasshopperteklalink.
- [33] **C. Preisinger**, "Linking Structure and Parametric Geometry," *Architectural Design*, vol. vol. 83, pp. 110,-111,112,113, 2013.
- [34] **T. Masso et al**, *Ehituskonstruktori Käsiraamat*. (4 ed., ed.) 2014.
- [35] **A. Räämet ja R. Räämet**, *Ehitusmehaanika. Varraskonstruksioonide Staatika*. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2018.

LISAD

LISA 1 – Parameetrilise geomeetria model



Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Nils Holger Sova,

(sünnipäev 05.12.1995)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Projekteerimisprotsessi efektiivsuse tõstmine parameetrilise modelleerimise abil,

mille juhendaja on Kadri Leiten,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

- 2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
- 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 31.05.2021

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)